



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

SUBWOOFER PRO PA APLIKACI

SUBWOOFER FOR PA APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Tylich

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Martiš, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Ondřej Tylich

ID: 203363

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Subwoofer pro PA aplikaci

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte teoretický rozbor dané problematiky. Uveďte typy používaných ozvučnic, jejich výhody a nevýhody.
2. Vyberte vhodný typ ozvučnice a reproduktoru. Ověřte potřebné parametry reproduktoru měření.
3. Proveďte celkový návrh ozvučnice včetně simulace frekvenční charakteristiky.
4. Ozvučnici realizujte a proveďte ověřovací měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Ladislav Svoboda, Reprodukory a reproduktorové soustavy.
- [2] DEXON, Reprodukory a reprosoustavy III.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 10.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Jan Martiš, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Obsahem práce jsou teoretické znalosti v odvětví reproduktorových ozvučnic, jejich konstrukce a řešení konstrukce subwooferu dle zadání. V práci jsou popsány jednotlivé typy používaných ozvučnic a u každé jsou definovány jejich vlastnosti. Pro kvalitní návrh jsou použity některé ze simulačních programů. Pro aplikaci subwooferu v PA technice je vybrán vhodný reproduktor. Parametry vybraného reproduktoru jsou ověřeny měřením a na základě těchto parametrů je počítán návrh vybrané ozvučnice. Dále práce řeší kompletní postup návrhu ozvučnice pro vybraný reproduktor a její následnou konstrukci. Po konstrukci je provedeno ladění nátrubku na zvolené parametry. Výsledné parametry zkonstruovaného subwooferu jsou ověřeny měřením impedanční a kmitočtové charakteristiky.

Klíčová slova

ozvučnice, reproduktor, bassreflex, bandpass, subwoofer

Abstract

The content of the bachelor's thesis is theoretical knowledge in the field of loudspeaker baffles, their construction and design of the subwoofer according to the assignment. The work describes various types of used loudspeaker baffles. Their properties are defined for each of them. Some of the simulation programs are used for proper design. A suitable speaker is selected for the subwoofer application in PA technology. The parameters of the selected loudspeaker are verified by measurement. Based on these parameters, the design of the selected loudspeaker is calculated. Furthermore, the thesis addresses deals with the complete design process of the baffle for the selected speaker and its subsequent construction. After the construction, the port is tuned to the selected parameters. The resulting parameters of the designed subwoofer are verified by measuring the amplitude and frequency characteristics.

Keywords

baffle, loudspeaker, bassreflex, bandpass, subwoofer

Bibliografická citace:

TYLICH, Ondřej. *Subwoofer pro PA aplikaci* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125795>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Jan Martiš.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Subwoofer pro PA aplikaci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Martišovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne:

.....
podpis autora

Obsah

1.	Úvod.....	13
2.	Typy ozvučnic	14
2.1	Desková ozvučnice.....	14
2.2	Otevřená ozvučnice	15
2.3	Uzavřená ozvučnice	16
2.4	Bassreflexová ozvučnice	20
2.5	Band – pass ozvučnice	24
2.5.1	Band – pass 4. řádu	25
2.5.2	Band – pass 6. řádu	28
2.6	Ozvučnice typu transmission-line	30
2.7	Ozvučnice s pasivním zářičem.....	31
3.	Ozvučnice s více reproduktory.....	32
3.1	Standartní konfigurace-dva reproduktory	32
3.2	Push-pull konfigurace	33
3.3	Konfigurace front to front – push-pull	33
3.4	Konfigurace back to back – push-pull	34
3.5	Konfigurace piggyback	35
4.	Konstrukce ozvučnic	36
4.1	Konstrukční materiály	36
4.1.1	Dřevotřísková deska – DTD	36
4.1.2	Medium density fibreboard – MDF	36
4.1.3	Překližky – PDP.....	37
4.1.4	Plast – ABS.....	37
4.1.5	Beton.....	37
4.1.6	Další materiály	37
4.2	Spojování stěn	37
4.3	Tlumení ozvučnice	38
5.	SW pro návrh, simulaci a měření	40
5.1	WinISD	40
5.1.1	Postup návrhu	41

5.2	Měření pramaterů reproduktorů	41
5.2.1	Program Limp	41
5.2.2	Postup měření	43
5.3	Měření kmitočtové charakteristiky	44
5.3.1	Postup měření	45
6.	Výběr a měření reproduktoru	46
6.1	Volba reproduktoru	46
6.2	Měření reproduktoru	48
7.	Volba ozvučnice	49
7.1	Simulace	50
7.1.1	Bandpass	50
7.1.2	Basreflex	51
8.	Návrh ozvučnice	52
8.1	Popis konstrukce	52
8.2	Výpočet parametrů ozvučnice	53
8.2.1	Výpočet rovného nátrubku	55
8.2.2	Simulace ozvučnice	56
8.2.3	Zahnutý nátrubek	59
9.	Konstrukce ozvučnice	61
9.1	Výběr konstrukčního materiálu	61
9.2	Výztuhy	62
9.3	Návrh v AutoCADu	62
9.4	Komponenty	63
9.4.1	Ochranné mříže	64
9.5	Ladění nátrubku	66
9.6	Spojování stěn	68
9.7	Povrchová úprava	68
9.8	Kompletace	69
10.	Měření subwooferu	70
10.1	Měření impedanční charakteristiky	70
10.2	Měření kmitočtové charakteristiky	71
11.	Závěr	74

Seznam symbolů a zkratk

Zkratky:

SPL	...	Sound pressure level
PA	...	Public address
T-S	...	Thiele/Small parameters
EPB	...	Efficiency Bandwidth Product
HiFi	...	High fidelity
RMS	...	Root mean square
AES	...	Audio Engineering Society
REW	...	Room EQ Wizard
RTA	...	Real time analyser

Symboly:

f_0	...	Dolní mezní kmitočet	[Hz]
f_b	...	Rezonanční kmitočet bassreflexové ozvučnice	[Hz]
f_b	...	Rezonanční kmitočet uzavřené ozvučnice	[Hz]
f_s	...	Rezonanční kmitočet reproduktoru	[Hz]
V_b	...	Objem skříně	[l]
V_{as}	...	Ekvivalentní objem	[l]
Q_{es}	...	Elektrický činitel jakosti	[-]
Q_{ms}	...	Mechanický činitel jakosti	[-]
Q_{ts}	...	Celkový činitel jakosti	[-]
M_{ms}	...	Hmotnost membrány reproduktoru	[g]
C_{ms}	...	Poddajnost závěsu reproduktoru	[m/N]
Bl	...	Silový faktor	[N/A]
R_e	...	Stejnoseměrný odpor kmitací cívky	[Ω]
L_e	...	Indukčnost kmitací cívky	[mH]
S_d	...	Plocha membrány reproduktoru	[cm ²]
λ	...	Vlnová délka	[m]
c_0	...	Rychlost zvuku	[m/s]
Z	...	Impedance	[Ω]
C_n	...	Šířka nátrubku	[m]

C_{sn}	...	Střední šířka nátrubku	[m]
l	...	Délka nátrubku	[m]

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Desková ozvučnice.....	15
Obr. 2-2 Otevřená ozvučnice	16
Obr. 2-3 Změna rezonanční frekvence reproduktoru.....	17
Obr. 2-4 Vysoké Q_{ts} -vznik "hrbu"	18
Obr. 2-5 Uzavřená ozvučnice	19
Obr. 2-6 Bassreflexová ozvučnice	20
Obr. 2-7 Změřená frekvenční charakteristika bassreflexové reposoustavy.....	22
Obr. 2-8 Impedanční charakteristika bassreflexové ozvučnice	23
Obr. 2-9 Ozvučnice typu band-pass 4. řádu.....	25
Obr. 2-10 Charakteristiky ozvučnice band pass pro $Q_{ts}=0,3$	27
Obr. 2-11-Impedanční charakteristika bandpass 4. řádu	28
Obr. 2-12 Band pass ozvučnice 6. řádu	29
Obr. 2-13-Impedanční charakteristika bandpass 6. řádu	29
Obr. 2-14-Konstrukce ozvučnice typu transmission-line	30
Obr. 2-15- Konstrukce ozvučnice s pasivním zářičem	31
Obr. 3-1-Dva reproduktory v ozvučnici	32
Obr. 3-2-Dva reproduktory v ozvučnici – push-pull	33
Obr. 3-3-Dva reproduktory v ozvučnici front to front – push-pull.....	34
Obr. 3-4-Dva reproduktory v ozvučnici back to back – push-pull	34
Obr. 3-5-Dva reproduktory v ozvučnici-piggyback	35
Obr. 4-1-Typy spojů stěn na tupo, na pokos a na pokos se zámkem.....	38
Obr. 4-2-Způsoby tlumení ozvučnic na stěny, na výztuhu a zig-zag	39
Obr. 5-1-Okno programu WinISD	40
Obr. 5-2-Schéma zapojení obvodu pro připojení ke zvukové kartě	42
Obr. 5-3-Okno programu Limp	42
Obr. 5-4-Nastavení pro měření	43
Obr. 5-5 Hlavní okno softwaru REW	44
Obr. 6-1-Katalogové parametry reproduktoru 18P1000ND [7]	47
Obr. 6-2 Rozměry reproduktoru 18P1000Nd [7].....	47
Obr. 6-3-Impedanční charakteristiky-měření.....	48

Obr. 7-1 Simulace ozvučnice bassreflex a bandpass	50
Obr. 8-1- Náskres čelní desky subwooferu	52
Obr. 8-2-Simulace kmitočtové charakteristiky	56
Obr. 8-3 Simulace impedanční charakteristiky	57
Obr. 8-4 Výsledná impedanční charakteristika.....	57
Obr. 8-5 Výsledná kmitočtová charakteristika simulace	58
Obr. 8-6 Zahnutý bassreflexový nátrubek	59
Obr. 9-1 Náskres konstrukce subwooferu	62
Obr. 9-2 Madlo Adam Hall [9]	63
Obr. 9-3 Připojovací terminál Adam Hall-2x Speakon [9].....	64
Obr. 9-4 Děrovaný plech RV 4;5 1:1 [10]	65
Obr. 9-5 Náskres ochranného děrovaného plechu.....	65
Obr. 9-6 Náskres ochranného děrovaného plechu – 3D.....	66
Obr. 9-7 Vnitřní zábrana-náskres	66
Obr. 9-8 Impedanční charakteristika pro nátrubek s délkou $X=0,202\text{ m}$	67
Obr. 9-9 Struktura Warnex [11].....	68
Obr. 10-1 Změřená impedanční charakteristika.....	70
Obr. 10-2 Měření u reproduktoru a nátrubku	71
Obr. 10-3 Měření ve vzdálenosti 1 m a napětí 2 V	72
Obr. 10-4 Příklad ekvalizace.....	73

Seznam tabulek

Tab. 2-1-Názvy aproximací	19
Tab. 2-2 Hodnoty pro sady charakteristik.....	26
Tab. 6-1-Změřené parametry reproduktoru	48
Tab. 8-1- Parametry pro výpočet- 2 reproduktory	54
Tab. 8-2 Hodnoty vypočtené programem WinISD.....	56

1. ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá teoretickým rozбором dané problematiky, seznámením se simulačními programy, volbou a návrhem ozvučnice a její následnou konstrukcí. Práce je zakončena měřením, které ukáže shodnost návrhu a simulací s výsledkem konstrukce. Je rozdělena do pěti pomyslných částí.

První část práce se věnuje teoretickému rozboru, a to celkovému shrnutí používaných reproduktorových ozvučnic. Tato problematika je velmi rozsáhlá, protože je řada způsobů, jak tyto ozvučnice řešit. Nic zde není jednoznačného, je zde spousta faktorů, které hrají roli jednak při teoretickém návrhu, ale i při výrobě ozvučnic, respektive při hotovém výrobku. Hotový výrobek, jež je zkonstruován podle návrhu a různých simulací či výpočtů častokrát neodpovídá těmto návrhům. Z tohoto důvodu je potřeba výsledný výrobek měřit a podle změřených hodnot jej případně doladit, aby byl návrh co nejpřesnější.

Druhá část práce pojednává o výběru vhodného typu ozvučnice a reproduktoru. Dále také o některých programech určených k měření parametrů reproduktoru a simulacím návrhu ozvučnic. Výsledkem druhé části této práce je určení parametrů vybraného reproduktoru pomocí uvedeného programu.

Třetí část řeší návrh vybrané ozvučnice, tzn. veškeré potřebné výpočty, jako je potřebný objem pro vybraný reproduktor. Výpočet délky bassreflexového nátrubku na základě volby rezonančního kmitočtu, který je určen pomocí impedanční charakteristiky. Řeší také jaký typ nátrubku použít, zdali rovný či zahnutý.

Čtvrtá část řeší samotnou konstrukci ozvučnice, respektive celého subwooferu, od výběru konstrukčního materiálu přes povrchovou úpravu až po potřebné komponenty. Je vytvořen konstrukční návrh, který definuje rozměry a tvar subwooferu. Dále je řešen postup ladění zahnutého nátrubku a celé kompletace subwooferu.

Poslední část práce pojednává o měření hotového subwooferu. Jsou měřeny dva typy charakteristik, a to amplitudová a kmitočtová. Změřené hodnoty jsou porovnány s hodnotami simulací.

2. TYPY OZVUČNIC

Postupně a dopodrobna si popíšeme problematiku zabývající se reproduktorovými ozvučnicemi. Existuje několik typů, které se v dnešní době používají, avšak některé z nich méně. Budeme se zabývat otevřenou, uzavřenou, bassreflexovou ozvučnicí, ozvučnicí typu bandpass a dalšími typy. Některé z nich jsou nenáročné na konstrukci nebo výpočet, ale některé jsou naopak zase obtížné na návrh. Ozvučnice se konstruují především pro basové reproduktory, popřípadě středobasové. U basových reproduktorů hrají velkou roli, především záleží na typu ozvučnice, podle kterého se pak výsledná reprosoustava bude chovat. Většinou nás zajímá frekvenční charakteristika v pásmu 20–400 Hz, kterou výrazně ovlivňuje typ ozvučnice. Většinou nám jde o získání maxima z daného basového reproduktoru, na kterém samozřejmě záleží nejvíce, respektive podle jeho parametrů určujeme, pro jakou ozvučnici se hodí. Řekl bych, že nejpoužívanější ozvučnice v dnešní době je ozvučnice bassreflexová, není až tak těžká na výpočet či návrh a zároveň má výborné vlastnosti.

2.1 Desková ozvučnice

Jedná se o nejjednodušší typ ozvučnice, v ideálním případě představuje desku o nekonečných rozměrech, toto však nemůže být splněno. Výhodou této ozvučnice je absence vlastní rezonance, to tedy znamená, že funguje až od daného kmitočtu. [1]

Pokud se zamyslíme nad užitím této ozvučnice, tak je z praktického hlediska naprosto nepoužitelná, avšak dřív se užívaly kvůli jejich jednoduchosti. Vyskytují se i dnes, avšak to nemusí být zřejmé. Představme si například stropní podhled, kdy mezi stropem a podhledem vznikne volný prostor, jehož výška může být cca 10-50 cm, záleží na výšce původního stropu. Jestliže do takového podhledu umístíme reproduktory, podhled bude tvořit deskovou ozvučnici o velkých rozměrech. Může se však zdát, že se jedná o uzavřenou ozvučnici, ale vzhledem k velkému objemu podhledu se jeví jako desková ozvučnice, avšak ve skutečnosti tuhost podhledu není velká.

Pro čtvercový tvar této ozvučnice platí vztah:

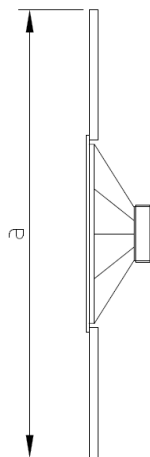
$$a \approx \frac{120}{f_s}, \quad (2.1)$$

kde f_s rezonanční frekvence reproduktoru.

Dolní mezní frekvence f_0 klesá se strmostí 6 dB/oct. a vypočteme jej dne vztahu:

$$f_0 \approx \frac{170}{a} \quad (2.2)$$

Dolní mezní frekvence se volí vyšší, než je rezonanční frekvence reproduktoru. [1]



Obr. 2-1 Desková ozvučnice

Na Obr. 2-1 je zobrazena desková ozvučnice o čtvercovém rozměru a .

2.2 Otevřená ozvučnice

Dnes už málo používaný typ ozvučnice, rozhodně bychom v ní nenašli basový reproduktor, protože nízké frekvence se vlivem akustického zkratu vytratí, závisí zde na hloubce ozvučnice. Řekl bych, že tato ozvučnice byla hojně používána ve 30. - 60. letech. Ten, kdo si ještě pamatuje například rozhlasové reproduktory tzv. „rozhlas po drátě“, tak zde byla užívána tato ozvučnice. Dále různé typy elektronkových rádií, kdy se jednalo například o velké skříně s absencí zadní stěny, nebo jen se sololitem a v něm otvory pro ventilaci. I dnes se můžeme s touto ozvučnicí setkat, hojně je užívána například u kytarových komb, které nemají zadní stěnu.

Pokud bychom se vrátili k už zmíněnému akustickému zkratu, který vzniká na nízkých kmitočtech, respektive u signálu s vlnovou délkou větší, než je hloubka skříně. Akustický zkrat proto, že se z otevřené části skříně, respektive ze zadní části membrány reproduktoru vrátí vlna o opačné fázi, než je vlna vyzářena přední stranou membrány, součtem těchto vln pak dojde k zániku nízkých kmitočtů. [1]

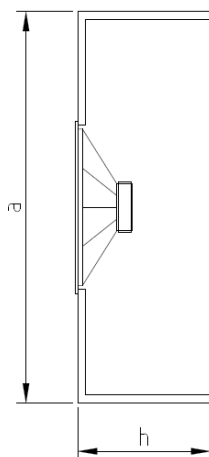
Pokud bychom zvětšovali hloubku skříně, vznikla by vlastní rezonance skříně, čím větší objem, respektive hloubka, tím by se frekvence vlastní rezonance snižoval. Rezonance má však za následek zvlnění výsledné frekvenční charakteristiky. Ideální hloubka skříně by měla být dle vztahu (2.1), poté jsme schopni vypočítat mezní rezonanční kmitočet dle vztahu (2.2).

$$a = 2 \text{ až } 4h \quad (2.3)$$

$$f_0 = \frac{55}{h \cdot \sqrt{\left(1 + 0,48 \cdot \frac{a}{h}\right)}} \quad (2.4)$$

Pak mezní kmitočet skříně může být vyšší než rezonanční kmitočet reproduktoru, respektive bude-li rezonanční kmitočet reproduktoru nižší než dolní mezní kmitočet ozvučnice, vznikne mezi těmito rezonančními kmitočty pokles, proto je vhodné volit dolní mezní kmitočet ozvučnice podle vztahu (2.5) [1]

$$f_0 \approx 3f_r \quad (2.5)$$



Obr. 2-2 Otevřená ozvučnice

Na obrázku 2 je vyobrazen ty konstrukce otevřené ozvučnice.

2.3 Uzavřená ozvučnice

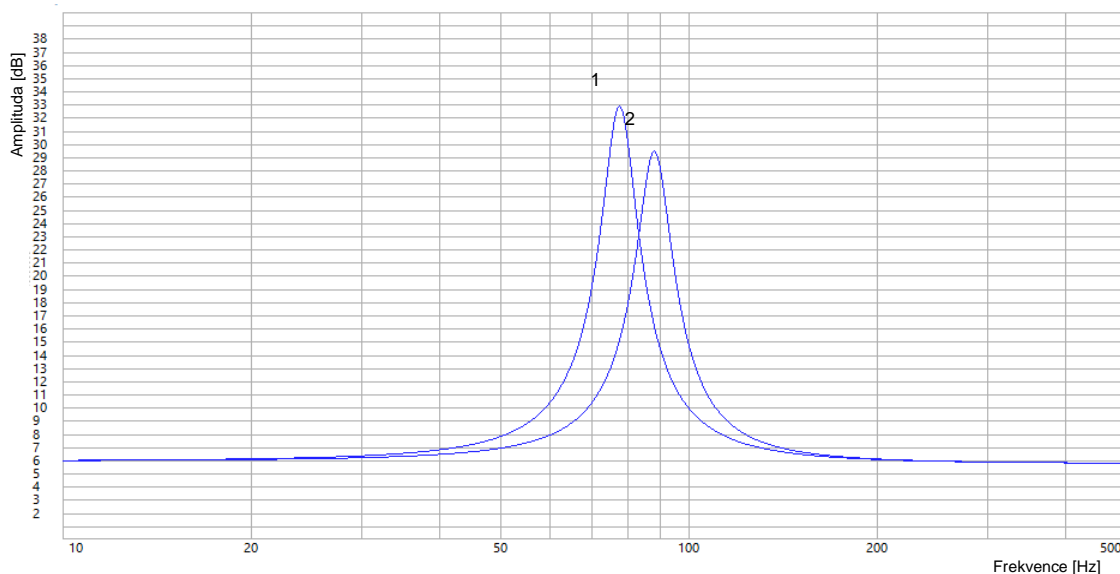
Už z názvu „uzavřená“, je zřejmé, že zde nebude docházet k akustickému zkratu, jelikož všechny její strany jsou uzavřené nemůže tedy produkovat vlny akustického signálu vyzářené zadní stranou membrány reproduktoru. Bohužel tak přicházíme o vlnu, respektive i o výkon vyzářený zadní stranou membrány, tato energie se přemění v teplo, avšak záleží na objemu ozvučnice. Návrh však není nijak složitý na návrh, ani na konstrukci. Pro výpočet nám bude sloužit pár vzorců, které si ukážeme později v této kapitole. [2]

Uzavřená ozvučnice využívána hojně v 60.-90. letech minulého století, hlavně pokud se podíváme na sortiment Tesly, co vyráběla v těchto letech. Řekl bych, že lidem v této době příliš nezáleželo na vyjádření nízkých kmitočtů reproduktorovými soustavami. Je sice pravda, že pokud změříme parametry tehdejších reproduktorů, tak málo který bychom mohli použít například v bassreflexové ozvučnici, aby výsledná kmitočtová charakteristika vyšla „slušně“. Snad hlavně proto, že jejich činitel jakosti Q_{ts} byl většinou větší jak 0,5. Proto Tesla vyráběla basové reproduktory s velmi nízkými rezonančními kmitočty f_s cca 20-30 Hz, poté se zvolením dostatečného objemu ozvučnice reprosoustavy produkovaly i nižší kmitočty. Uzavřená ozvučnice však najde uplatnění

spíše u středových, či středobasových systémů třeba s použitím subwooferu, který využívá jiný typ ozvučnice.

Správná ozvučnice by měla být hermeticky uzavřená, respektive dokonale utěsněna, což nebývá problém u konstrukce skříně, ale spíše u utěsnění okolo reproduktorů a připojovacích terminálů. Pokud by se však někde objevila i malá skulina, vlivem změn tlaku uvnitř skříně by docházelo k proudění vzduchu skulinou a pak následným pazvukům způsobenými turbulentními jevy. Těmto jevům se však snažíme vyhnout.

Nyní se podíváme, co se v této ozvučnici děje, jak se chová společně s reproduktorem. Pochopitelně závisí na parametrech daného reproduktoru, podle nich teprve volíme druh ozvučnice, respektive zvážíme, zdali by nebylo výhodnější použít nějaký jiný výhodnější typ ozvučnice, jako je například ozvučnice typu bassreflex a jiné, které popíšu v dalších kapitolách. Mějme tedy reproduktor s danou rezonanční frekvencí f_s a ekvivalentním objemem V_{as} a ozvučnici o daném objemu V_b a rezonančním kmitočtem f_c . Ekvivalentní objemy berme jako poddajnost jak membrány reproduktoru, tak i objemu vzduchu ozvučnice. Vložíme-li reproduktor do hermeticky uzavřené ozvučnice, dojde ke změně poddajnosti membrány, tudíž i ke změně jeho rezonanční frekvence.



Obr. 2-3 Změna rezonanční frekvence reproduktoru

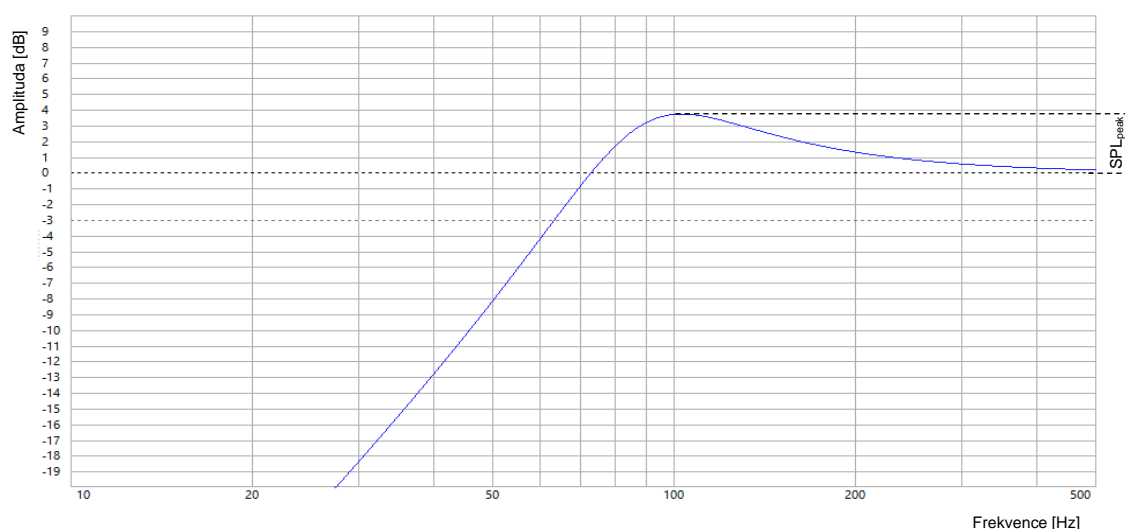
Spojením poddajnosti reproduktoru a ozvučnice dojde k vytvoření nové poddajnosti, respektive vyšší rezonanční kmitočtu. Na vyobrazeném průběhu impedanční charakteristik na obrázku Obr. 2-3 můžeme vidět posun rezonanční frekvence z bodu 1 do bodu 2. Vzniklý rezonanční kmitočet nikdy nebude nižší než rezonance reproduktoru, může být blížíci se ale to jen v případě extrémně velkého objemu ozvučnice, je to také vidět podle vztahu

$$\frac{f_c}{f_s} = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1} \quad (2.6)$$

Podobný vzorec pro výpočet činitele jakosti, i tento parametr se zvýší, pro jeho výpočet použijeme vztah

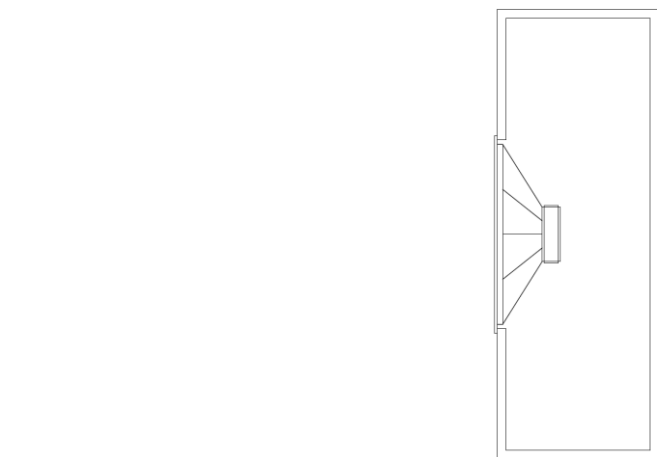
$$\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}} = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1} \quad (2.7)$$

Zvýšení činitele jakosti může někdy působit nepříznivě, obzvláště u reproduktorů s Q_{ts} větším jak 0,6 se na ohybu frekvenční charakteristiky vytvoří převýšení neboli „hrb“ je znázorněn simulaci uzavřené ozvučnice v programu WinISD, Obr. 2-4. Tyto reproduktory pak vyžadují větší objem ozvučnice. [2]



Obr. 2-4 Vysoké Q_{ts} -vznik "hrbu"

Nastává zde ale problém, jelikož reproduktor nehraje do poloprostoru, jako tomu bylo u deskové ozvučnice, respektive u nekonečně rovinné desky, dojde ke snížení citlivosti. Reproduktor totiž hraje nejen z přední strany membrány, ale i ze zadní strany, která hraje do prostoru. Opět záleží na objemu dané skříně, při větším objemu toto snížení citlivosti nemusí být tak markantní, v nejhorším případě je však citlivost snížena o 6 dB. Tento útlum však není konstantní na celé frekvenční charakteristice, může platit jen pro některé pásma. V domácích podmínkách to výsledek příliš neovlivní, protože reproduktorové soustavy se nachází vždy v nějaké místnosti v blízkosti určitých předmětů, jako je nábytek a zdi, pak útlum nemusí být tak znatelný. Horší to však je ve venkovním prostředí, kdy nedochází k odrazům. [2]



Obr. 2-5 Uzatvřená ozvučnice

Nyní se podíváme, jaký objem je vhodný zvolit, respektive jak k němu dojít. Už tedy víme, že na objemu závisí daný „hrb“, označený na amplitudové charakteristice Obr. 2-4, jako SPL_{peak} a také víme, že závisí na celkovém činiteli jakosti Q_{ts} . Pro výpočet užíváme znalostí filtrů, především filtrů 2. řádu, kdy pro jejich činitel jakosti Q_{tc} platí převýšení SPL_{peak} . Názvy aproximací jsou uvedeny v Tab. 2-1-Názvy aproximací.

<i>Aproximace</i>	Q_{ts}	$SPL_{peak} [dB]$
Linkwitz–Riley	0,500	
Bessel	0,570	
Butterworth	0,707	0,00
	0,800	0,21
	0,900	0,69
Chebyshev	0,956	1,00

Tab. 2-1-Názvy aproximací

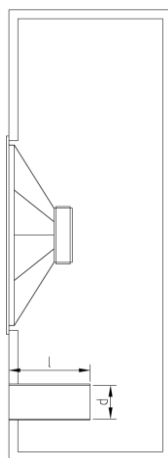
Podle tabulky vidíme, že nejvhodnější je zvolit aproximaci Butterworth s $Q_{tc}=0,707$, kdy by teoreticky měla být frekvenční charakteristika „rovná“. Pak objem vypočteme podle vzorce:

$$V_{opt} = V_{as} \cdot \frac{Q_{ts}^2}{2 - Q_{ts}^2} \quad (2.8)$$

Jedná se tedy o optimální objem, který někdy může vyjít nepoměrně velký, k danému reproduktoru, poté je třeba zvolit nějaký kompromis dle velikosti reproduktoru. [2]

2.4 Bassreflexová ozvučnice

Nyní se konečně dostáváme k ozvučnicím, které se hojně využívají u subwooferů neboli basových reprosoustav. Jak už můžeme tušit, tak díky této ozvučnici získáváme nižší frekvence. V dnešní době je tímto typem ozvučnice vyráběna většina reprosoustav a subwooferů, však přes to má tato ozvučnice spoustu nevýhod, ale taky výhod. Jedná se tedy o ozvučnici, ve které se nachází nějaký otvor, bývá to to nejčastěji nějaká roura zapuštěná uvnitř ozvučnice. Bassreflexový nátrubek můžeme tedy vytvořit pomocí roury, nebo v případě větších ploch zvukovodem o obdélníkovém průřezu. Jak určit přesnou délku si ukážeme později ve výpočtu. Oproti uzavřené ozvučnici zde využíváme i zadní stranu membrány reproduktoru, a proto získáváme i vyšší citlivost.



Obr. 2-6 Bassreflexová ozvučnice

Podíváme se tedy na výhody a nevýhody, i přes to, že mají spoustu nevýhod, tak se zkrátka pro většinu aplikací vyplatí.

Výhody:

Určitě je nějaký důvod, proč je tato ozvučnice tak hojně užívána, je to především obecně kvůli zvýšení účinnosti. Umí i při menším objemu skříňe vyjádřit nižší kmitočty, tudíž získáváme „hutnější“ basy. Reprodukter je méně mechanicky namáhán nad rezonančním kmitočtem nátrubku, reproduktor má menší výchylku membrány. Protože má reproduktor menší výchylku membrány, má tedy i menší zkreslení. [2]

Nevýhody:

Mezi hlavní nevýhody patří vyšší složitost jak návrhu, tak i konstrukce. Pokud nemáme přesné T-S parametry reproduktoru, nejsme schopni navrhnout tuto ozvučnici správně, respektive přesně. To, že musí být ozvučnice dokonale těsná je samozřejmost. Dolní strmota frekvenční charakteristiky je 24 dB/oct, čili strmější jak u uzavřené ozvučnice. Signálem se spektrem nižších kmitočtů může dojít k mechanickému poškození reproduktoru vlivem velké výchylky, která se zvětšuje pod rezonančním kmitočtem nátrubku. A v neposlední řadě to jsou turbulentní jevy v bassreflexovém

nátrubku, kdy při proudění vzduch může docházet ke vzniku pazvuků linoucí se z nátrubku. Proto je důležité volit vhodné průměry nátrubku, aby nebyla rychlost vzduchu proudící nátrubkem zbytečně velká. [2]

Jak jsem již zmínil výše, ne každý hloubkotónový reproduktor se do této ozvučnice hodí. Můžeme mít reproduktor, kdy podle jeho parametrů počítáme danou bassreflexovou ozvučnici a délka nátrubku nám vychází nepoměrně velká až tak, že by se nám nevešel do ozvučnice, jednoduše řečeno. Zkrátka efektivita by nebyla příliš velká, nebo by nám vycházela nehezka frekvenční charakteristika.

Proto je vhodné před návrhem si ověřit, zdali můžeme daný reproduktor použít, k tomuto účelu můžeme využít činitele EBP (Efficiency Bandwidth Product) dle vzorce:

$$EBP = \frac{f_s}{Q_{es}}. \quad (2.9)$$

Jedná se však pouze o informativní hodnotu, jejíž mez $>50>$ určuje vhodnost reproduktoru. K určení nám postačí pouze 2 parametry reproduktoru, a to elektrický činitel Q_{es} a rezonanční kmitočet f_s . Pokud vyjde $EBP < 50$, reproduktor se nehodí pro bassreflexovou ozvučnici, ale spíše pro uzavřenou ozvučnici a pokud vyjde $EBP > 50$, je reproduktor vhodný pro bassreflexovou ozvučnici. [2]

Nyní se podíváme na princip této ozvučnice. Něco málo jsme si pověděli už výše, od uzavřené ozvučnice se liší tím, že má bassreflexový nátrubek, tento nátrubek není nic jiného než rezonátor. To tedy znamená, že oproti uzavřené ozvučnici přidáváme další rezonanční kmitočet, budeme mít ve výsledku dva rezonanční obvody, reprosoustavu, respektive reproduktor s ozvučnicí a samotný nátrubek. Oba tyto rezonanční obvody naladíme na stejný rezonanční kmitočet f_b , a jestliže známe objem ozvučnice V_b a parametry nátrubku, délku l a plochu S , můžeme jej vypočítat podle vztahu:

$$f_b = \frac{c_o}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{V_b \cdot (l + 0,96 \cdot \sqrt{S})}} = 54,6 \cdot \sqrt{\frac{S}{V_b \cdot (l + 0,96 \cdot \sqrt{S})}}. \quad (2.10)$$

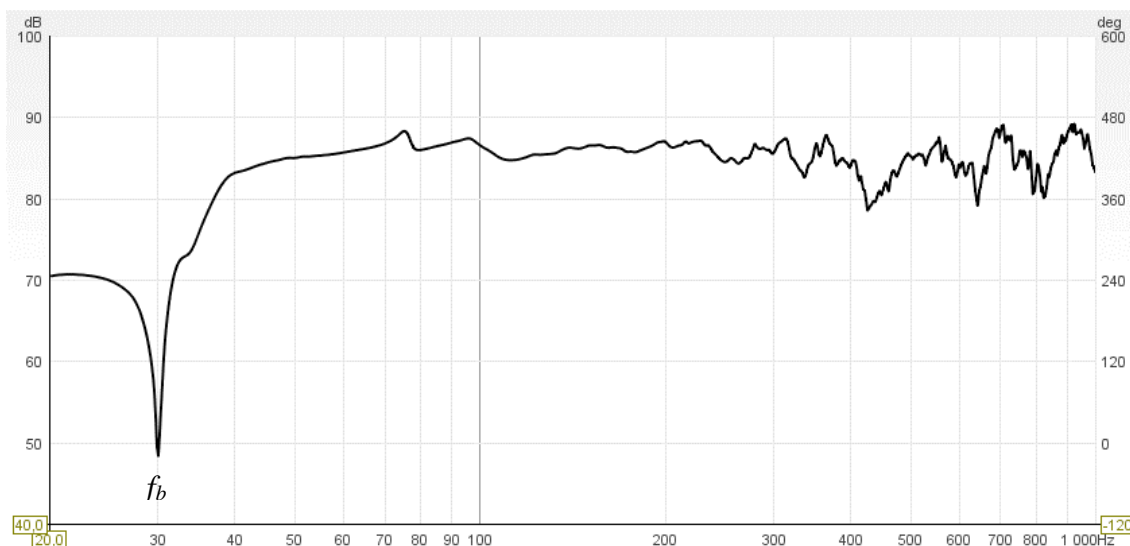
Konstanta 0,96 platí v případě, že je délka nátrubku mnohem delší než jeho průměr, pokud je však délka srovnatelně velká jako průměr, pak volíme konstantu 0,91. Tím, že naladíme nátrubek na společný rezonanční kmitočet f_b se bude v nátrubku pohybovat masa vzduchu, která bude klást právě na tomto kmitočtu odpor reproduktoru. Ve výsledku se to projeví tím, že na rezonančním kmitočtu bude mít reproduktor nejmenší výchylku. Tím, že má reproduktor menší výchylku se zmenší i akustický tlak vyzářený z reproduktoru, ale zvýší se vycházející z bassreflexového nátrubku. Hlavním úkolem nátrubku je obrátit fázi signálu vyzářeného zadní stranou membrány reproduktoru a dostat signál ven ve fázi se signálem z přední strany reproduktoru. [2]

Tento jev jsem si ověřil v praxi, při změření frekvenční charakteristiky v blízkosti reproduktoru dostaneme signál vyzářený reproduktorem. Onen rezonanční kmitočet nátrubku je jasně vidět. Jak víme, je v místě, kdy má membrána nejmenší výchylku, a tedy

kdy je nejmenší SPL (Akustický tlak). Z průběhu na Obr. 2-7 vidíme, že rezonanční kmitočet nátrubku je přesně 30 Hz.

No a nyní se nabízí otázka, proč tomu tak je. Ač tímto rezonátorem utlumíme reproduktor na naladěném kmitočtu, získáme za to rozšíření pásma, a to směrem dolů. Posuneme se tak přibližně o 20 Hz níž oproti uzavřené ozvučnici. Pochopitelně naladěný kmitočet nemůže ležet na frekvenční charakteristice kdekoli, je to dosti podstatné, kde jej umístíme, tak aby nám vyšla co nejrovnější frekvenční charakteristika. [2]

Bassreflexový nátrubek se většinou ladí na kmitočty i Hi-Fi cca 30-40 Hz, kdy míváme rezonanční kmitočty reproduktorů f_s okolo 35 Hz, jestli že se bavíme o subwooferech, kde jde o vyzáření co nejnižších kmitočtů. U výkonnějších systémů, jako je PA (public address) technika, se kmitočty posazují výše, zaleží na konstrukci, řádově cca 40-60 Hz.

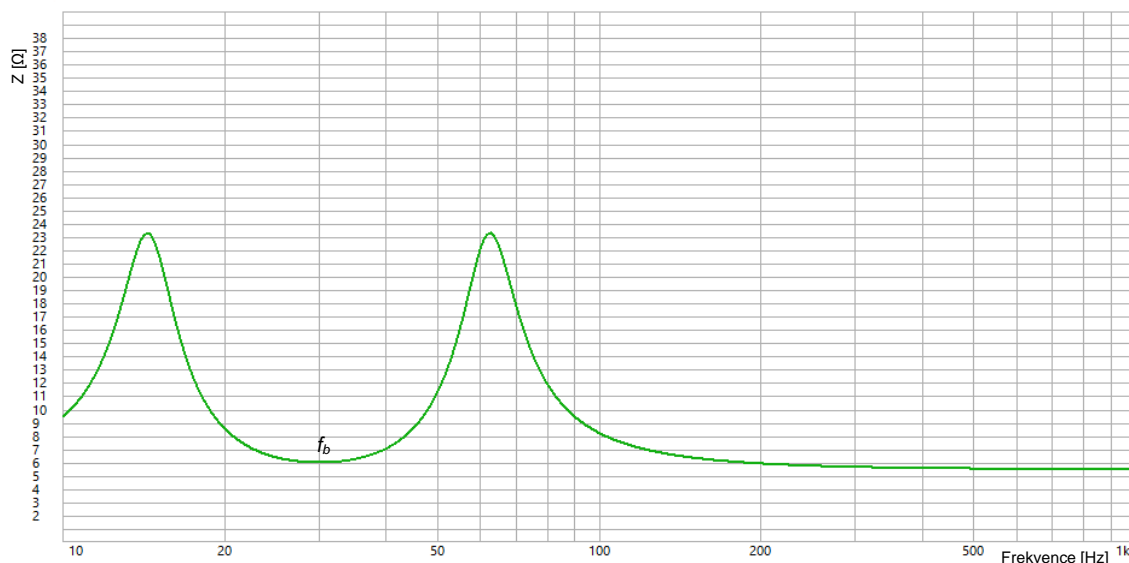


Obr. 2-7 Změřená frekvenční charakteristika bassreflexové reprosoustavy

Pomocí tohoto jevu můžeme bez jakýchkoliv výpočtů zjistit rezonanční kmitočet neznáme reprosoustavy, respektive kmitočet, na který je nátrubek naladěn. Pokud budeme do reprosoustavy přivádět signál o frekvenci od cca 30 Hz po kroku 1 Hz výše, dostaneme se časem k jevu, kdy se výchylka reproduktoru rapidně sníží, zde je onen rezonanční kmitočet nátrubku. Všimneme si také, že při něm je největší „rychlost“ průtoku vzduchu v nátrubku.

Ted' se podíváme na impedanční charakteristiku. Jak si pamatujeme, u uzavřené ozvučnici se na impedanční charakteristice nachází jeden vrchol, který zároveň představuje rezonanční frekvenci boxu f_c . U bassreflexové ozvučnice máme 2 impedanční maxima, první se nejčastěji nachází mez 10-20 Hz, vrcholy zde nepředstavují rezonanční kmitočet ozvučnice, ten se však nachází na nejnižší hodnotě impedance mezi těmito impedančními vrcholy. Pro ukázkou jsem tento jev vyobrazil na změřené charakteristice

bassreflexové ozvučnice v programu Room EQ Wizard (REW), charakteristika je vyobrazena na Obr. 2-7. [2]



Obr. 2-8 Impedanční charakteristika bassreflexové ozvučnice

Pokud bychom chtěli navrhnout basreflexovou ozvučnici bez užití simulačních softwarů, můžeme ji vypočítat podle několik vzorců. Uvedu zde vztahy pro výpočet s aproximací „Maximally flat“. Jak je z názvu aproximace zřejmé, budeme se snažit vytvořit návrh s možno co nejrovnější amplitudovou charakteristikou. Pro tuto charakteristiku vypočteme objem skříně V_b dle vztahu

$$V_b = 15,33 \cdot V_{as} \cdot Q_{ts}^{2,86}. \quad (2.11)$$

Dále pak vypočteme dolní mezní kmitočet f_3

$$f_3 = \frac{0,26 \cdot f_s}{Q_{ts}^{1,4}}, \quad (2.12)$$

rezonanční kmitočet f_b

$$f_b = \frac{0,42 \cdot f_s}{Q_{ts}^{0,9}}. \quad (2.13)$$

Podle průměru reproduktoru si zvolíme průměr nátrubku, respektive jeho plochu, jde o to, aby v nátrubku nedocházelo k turbulentním jevům, pak při větších výchylkách dochází k nepříjemným pazvukům, způsobeným vlivem proudění zvuku. Délku nátrubku l v metrech vypočteme podle vztahu

$$l = \frac{2361 \cdot d^2}{f_b^2 \cdot V_b} - 0,732 \cdot d. \quad (2.14)$$

Je vhodné volit průměr co největší tak, aby se konstrukčně vešel svou délkou do ozvučnice. [2]

Při výpočtech s touto aproximací můžeme narazit na problém, že dle výpočtu objemu skříně nám vyjde nepoměrně velký objem vůči reproduktoru. Vypočtený objem odpovídá rovné amplitudové charakteristice, respektive charakteristice bez „hrbu“. Někdy objem vyjde několikanásobně větší, než bychom potřebovali. Pak nám nezbyde nic jiného než spočítat nové hodnoty výše uvedených výpočtu. Nyní ale budeme počítat podle jiných vzorců.

Pak pro zvolený objem V_b' , vypočteme opět dolní mezní kmitočet f_3

$$f_3' = f_s \cdot \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b'}}, \quad (2.15)$$

a rezonanční kmitočet f_b

$$f_b' = f_s \cdot \left(\frac{V_{as}}{V_b'}\right)^{0,32}. \quad (2.16)$$

Pro nové hodnoty vypočteme novou délku nátrubku l'

$$l' = \frac{2361 \cdot d^2}{f_b'^2 \cdot V_b'} - 0,732 \cdot d. \quad (2.17)$$

A v poslední řadě zjistíme, jakou výšku má vzniklý hrb na amplitudové charakteristice, a to pomocí vzorce

$$SPL_{paak} = 20 \log \cdot \left[2,6 \cdot Q_{ts} \cdot \left(\frac{V_{as}}{V_b'}\right)^{0,35} \right]. \quad (2.18)$$

Z výchozích hodnot výpočtů podle aproximace „Maximally flat“ musí hodnota SPL_{paak} vyjít 0 dB. Při zmenšení objemu se však na amplitudové charakteristice vytvoří hrb, jehož výšku bychom měli znát, jako příklad je vyobrazen na Obr. 2-4 [2]

2.5 Band – pass ozvučnice

V dnešní době rozšiřující se typ ozvučnice, který se používá nejen pro výkonné aplikace, ale i pro menší systémy. Užití však najdeme pouze u subwooferů, protože tato ozvučnice funguje jako pásmová propust'. Ve výsledku dostáváme pouze úzké pásmo signálu, které se nachází na nízkých kmitočtech se šířkou pásma cca 70 Hz. Subwoofer s touto ozvučnicí poznáme velmi jednoduše, bude to „bedna“ bez reproduktoru umístěného na nějaké z vnějších stran, ani pod nějakou mřížkou jej nenajdeme. Vnitřní objem ozvučnice je rozdělen na 2 části, přičemž je reproduktor umístěn na dané přepážce

rozdělující objem. Ozvučnice pak má jeden nebo více bassreflexových nátrubků a odnímatelnou stěnu, abychom se dostali k reproduktoru.

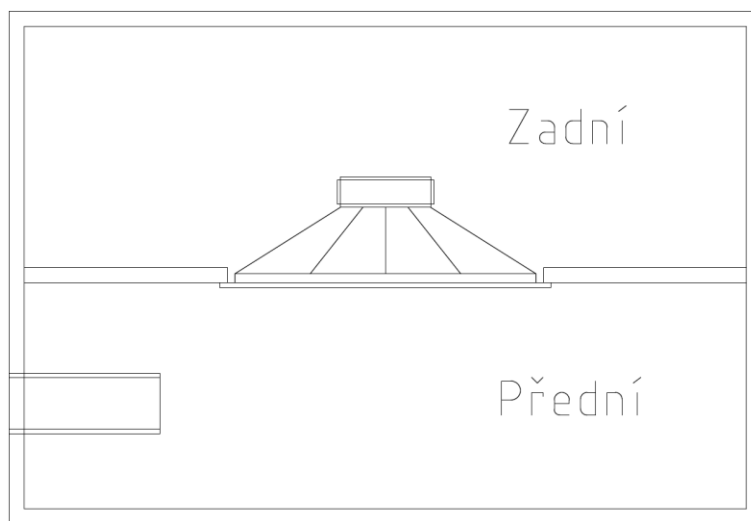
Ozvučnice se tedy chová jako subwooferová výhybka, avšak to neznamená, že ji nebudeme užívat. Pokud bychom nepoužili vhodnou výhybku, dodávali bychom do reproduktoru signál, který by nebyla schopna ozvučnice vyzářit. Zbytečně bychom tak přetěžovali reproduktor signálem, který stejně neuslyšíme. [2]

Pro výpočet budou opět stačit tři parametry reproduktoru, jako v pro výpočty minulých ozvučnic, a to f_s , Q_{ts} a V_{as} . Úkolem bude najít celkový objem V_b ozvučnice a pak poměr objemů dvou komor $V_{přední}/V_{zadní}$ a rezonanční kmitočet přední komory f_b , dále také délku bassreflexového nátrubku. [2]

Ozvučnice band-pass, může být provedena dvěma základními způsoby. První typ band-pass ozvučnice je 4. řádu, obsahuje 2 komory, přičemž jen jedna má bassreflexový nátrubek. Druhým typem je ozvučnice 6. řádu, u které má každá komora bassreflexový nátrubek.

2.5.1 Band – pass 4. řádu

Grafické zobrazení jednoduchého typu ozvučnice typu band-pass 4. řádu je vyobrazena na Obr. 2-9.



Obr. 2-9 Ozvučnice typu band-pass 4. řádu

Jestliže se budeme zabývat výpočtem této problematiky, tak abychom se vyhnuli složitým výpočtům, můžeme využít již vypočtené tzv. normované charakteristiky, kde pro daný Q_{ts} reproduktoru odpovídá určitá sada charakteristik. Podle zvolené charakteristiky jsme pak schopni dopočítat rezonanční kmitočet bassreflexového nátrubku, celkový objem ozvučnice a poměr zadní a přední komory. [2]

$V_b = 2 \cdot V_{of}$						
	+3 dB		0 dB		-3 dB	
Q_{ts}	$V_{přední}$	f_b	$V_{přední}$	f_b	$V_{přední}$	f_b
0,3	$0,568 \cdot V_b$	$1,117 \cdot f_{ob}$	$0,478 \cdot V_b$	$1,024 \cdot f_{ob}$	$0,390 \cdot V_b$	$0,954 \cdot f_{ob}$
0,4	$0,552 \cdot V_b$	$1,130 \cdot f_{ob}$	$0,460 \cdot V_b$	$1,042 \cdot f_{ob}$	$0,370 \cdot V_b$	$0,977 \cdot f_{ob}$
0,5	$0,535 \cdot V_b$	$1,151 \cdot f_{ob}$	$0,440 \cdot V_b$	$1,069 \cdot f_{ob}$	$0,348 \cdot V_b$	$1,008 \cdot f_{ob}$
0,6	$0,510 \cdot V_b$	$1,175 \cdot f_{ob}$	$0,412 \cdot V_b$	$1,100 \cdot f_{ob}$	$0,322 \cdot V_b$	$1,048 \cdot f_{ob}$
0,7	$0,485 \cdot V_b$	$1,209 \cdot f_{ob}$	$0,385 \cdot V_b$	$1,142 \cdot f_{ob}$	$0,295 \cdot V_b$	$1,095 \cdot f_{ob}$
0,8	$0,455 \cdot V_b$	$1,248 \cdot f_{ob}$	$0,355 \cdot V_b$	$1,190 \cdot f_{ob}$	$0,268 \cdot V_b$	$1,150 \cdot f_{ob}$
$V_b = 5 \cdot V_{of}$						
	+3 dB		0 dB		-3 dB	
Q_{ts}	$V_{přední}$	f_b	$V_{přední}$	f_b	$V_{přední}$	f_b
0,2	$0,565 \cdot V_b$	$0,707 \cdot f_{ob}$	$0,475 \cdot V_b$	$0,649 \cdot f_{ob}$	$0,388 \cdot V_b$	$0,606 \cdot f_{ob}$
0,3	$0,540 \cdot V_b$	$0,724 \cdot f_{ob}$	$0,445 \cdot V_b$	$0,671 \cdot f_{ob}$	$0,355 \cdot V_b$	$0,632 \cdot f_{ob}$
0,4	$0,502 \cdot V_b$	$0,749 \cdot f_{ob}$	$0,405 \cdot V_b$	$0,704 \cdot f_{ob}$	$0,315 \cdot V_b$	$0,672 \cdot f_{ob}$
0,5	$0,458 \cdot V_b$	$0,787 \cdot f_{ob}$	$0,358 \cdot V_b$	$0,749 \cdot f_{ob}$	$0,270 \cdot V_b$	$0,724 \cdot f_{ob}$
0,6	$0,405 \cdot V_b$	$0,834 \cdot f_{ob}$	$0,308 \cdot V_b$	$0,806 \cdot f_{ob}$	$0,228 \cdot V_b$	$0,787 \cdot f_{ob}$
0,7	$0,355 \cdot V_b$	$0,894 \cdot f_{ob}$	$0,262 \cdot V_b$	$0,872 \cdot f_{ob}$	$0,192 \cdot V_b$	$0,859 \cdot f_{ob}$
0,8	$0,305 \cdot V_b$	$0,963 \cdot f_{ob}$	$0,222 \cdot V_b$	$0,947 \cdot f_{ob}$	$0,162 \cdot V_b$	$0,937 \cdot f_{ob}$

Tab. 2-2 Hodnoty pro sady charakteristik

Opět známe T-S parametry reproduktoru f_s , Q_{ts} a V_{as} , například $Q_{ts}=0,3$, vypočteme pomocné hodnoty podle vztahů:

Referenční rezonanční kmitočet:

$$f_{ob} = \frac{f_s}{Q_{ts}} \quad (2.19)$$

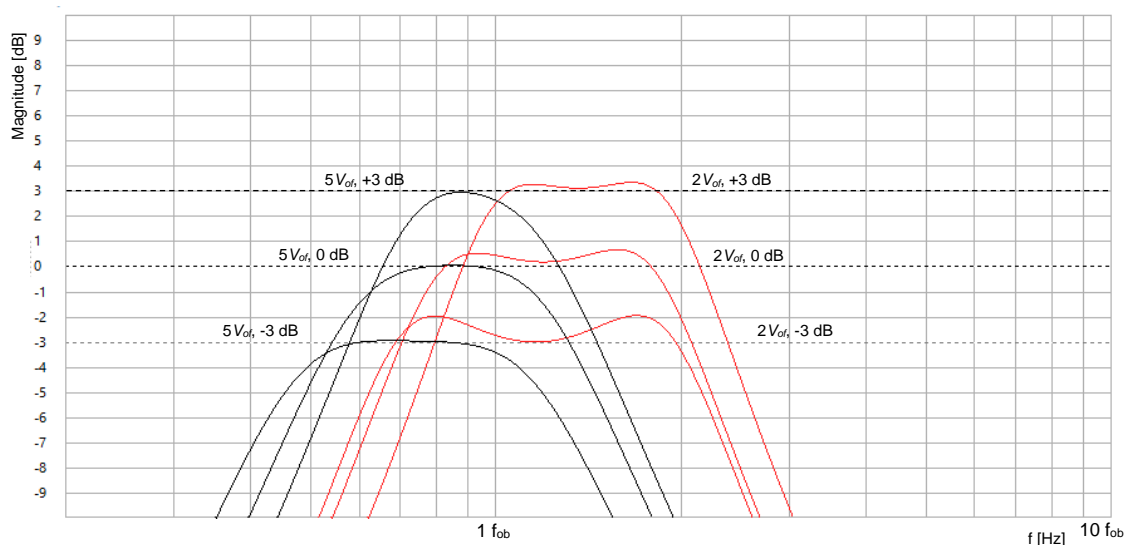
Referenční objem skříně:

$$V_{of} = V_{as} \cdot Q_{ts} \quad (2.20)$$

Dle Q_{ts} reproduktoru si vybereme vhodnou, pro ukázkou použijeme charakteristiky pouze pro $Q_{ts}=0,3$. Výběrem dané charakteristiky si můžeme nastavit šířku pásma a citlivost, červeně uvedené charakteristiky jsou pro objem $2 \cdot V_{of}$ a černě pro $5 \cdot V_{of}$. Charakteristiky pro jeden reproduktor jsou vyobrazeny na Obr. 2-10. [2]

Můžeme si také všimnout, že záleží na zisku ozvučnice, pokud bychom chtěli mít citlivost o 3 dB větší, získáme tak větší akustický tlak, ale zúží se šířka vyzářeného pásma. V praxi to znamená, že na úkor zúžení pásma získáme dvojnásobek v daném pásmu, velmi výhodné v PA, kdy se maximální SPL nachází v rozmezí cca 50-90 Hz. V tomto pásmu se nachází velká dynamika hudby, především od „kopáku“, proto zde chceme

získat co možno největší akustický tlak. Jestliže chceme získat i nižší kmitočty, musíme pak zvětšit šířku pásma, a to bude znamenat snížení citlivosti dle charakteristik



Obr. 2-10 Charakteristiky ozvučnice band pass pro $Q_{ts}=0,3$

Máme tedy zvolenou charakteristiku, která je pro naši aplikaci nejvhodnější, dle Tab. 2-2 a Q_{ts} reproduktoru vypočteme objem přední komory, následně objem zadní komory a rezonanční kmitočet přední komory f_b , respektive bassreflexového nátrubku.

Objem přední komory

$$V_{přední} = k \cdot V_b, \quad (2.21)$$

Kde k je hodnota uvedena v Tab. 2-2 příslušného řádku a sloupce pro výpočet $V_{přední}$.

Objem zadní komory vypočteme:

$$V_{zadní} = V_b - V_{přední}, \quad (2.22)$$

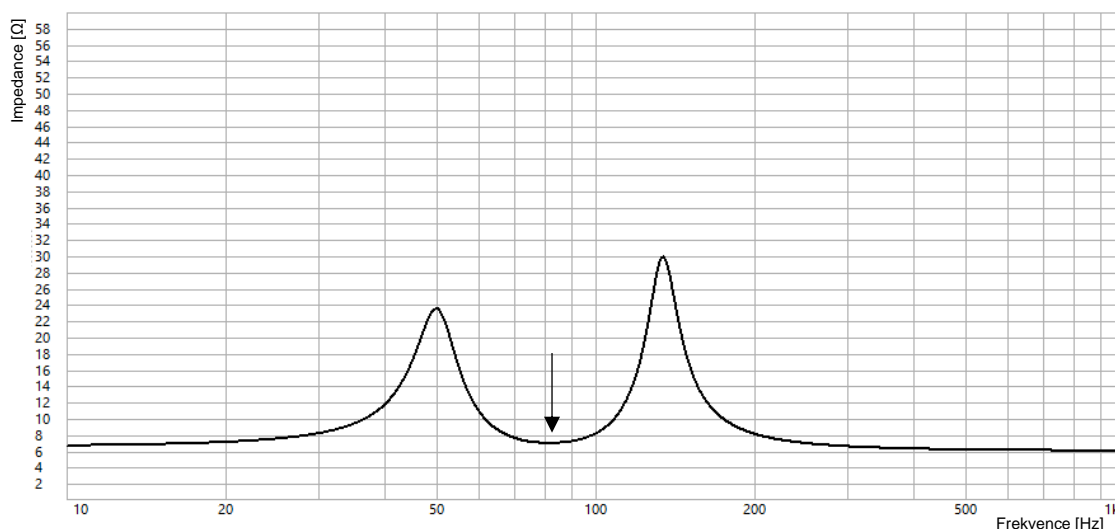
a konečně se dostáváme k délce bassreflexového nátrubku

$$l = \frac{2361 \cdot d^2}{f_b^2 \cdot V_p} - 0,732 \cdot d, \quad (2.23)$$

přičemž d je průměr nátrubku. [2]

Záměrně zde nejsou uvedené charakteristiky pro více hodnot Q_{ts} , jak je uvedeno v tabulkách výše, kde počítáme s rozmezím 0,2-0,8. Nejsou uvedeny i proto, že do hodnoty $Q_{ts}=0,5$, jsou křivky téměř stejné a není tak třeba uvádět další charakteristiky. Křivky se znatelně liší svým zvlněním až od hodnoty $Q_{ts}=0,6$, přičemž celkový činitel jakosti u profesionálních basových reproduktorů se pohybuje v rozmezí 0,25-0,5, proto si vystačíme pouze s jednou sadou charakteristik.

Impedanční charakteristika bude vypadat podobně jako u bassreflexové ozvučnice, ve které používáme jeden rezonátor v podobě nátrubku. Bude však umístěna ve vyšších kmitočtech, protože u této ozvučnice ladíme nátrubek přední komory na vyšší kmitočet než u bassreflexové ozvučnice, a to řádově 70-130 Hz, dle reproduktoru. Charakteristika má opět dvě impedanční maxima, mezi kterými se nachází „sedlo“, respektive nejnižší hodnota impedance, na tomto jistém kmitočtu se nachází i rezonanční kmitočet nátrubku. Charakteristika je vyobrazena na Obr. 2-11, sedlo mezi impedančními maximy je vyznačeno šipkou.

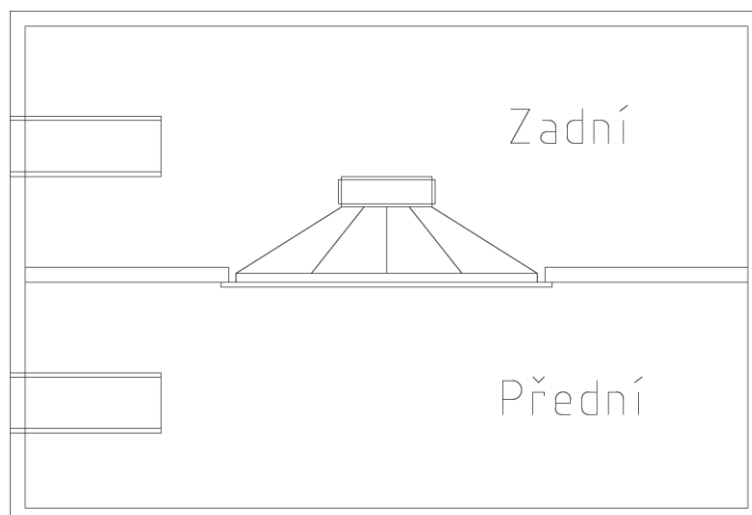


Obr. 2-11-Impedanční charakteristika bandpass 4. řádu

Tato metoda je na úkor své jednoduchosti nepřesná, respektive neuvidíme výslednou charakteristiku, ve skutečnosti se může od uvedené sady velmi lišit, protože tvar charakteristiky závisí i na ekvivalentním objemu a rezonančním kmitočtu reproduktoru. Například u bassreflexové ozvučnice jsme byli schopni vypočítat výšku hrbu na kmitočtové charakteristice. Vždy je lepší vytvořit simulaci daného problému ve vhodném softwaru. V podstatě jistý software, kterému se budu věnovat později bude ozvučnici navrhovat metodou podobné této, ale v simulaci si můžeme s charakteristikou ještě „pohrát“. Změnou objemu celé ozvučnice, poměru předního a zadního objemu a rezonančním kmitočtem budeme měnit výslednou charakteristiku, můžeme tak docílit například posunutí charakteristiky do nižších hodnot kmitočtů.

2.5.2 Band – pass 6. řádu

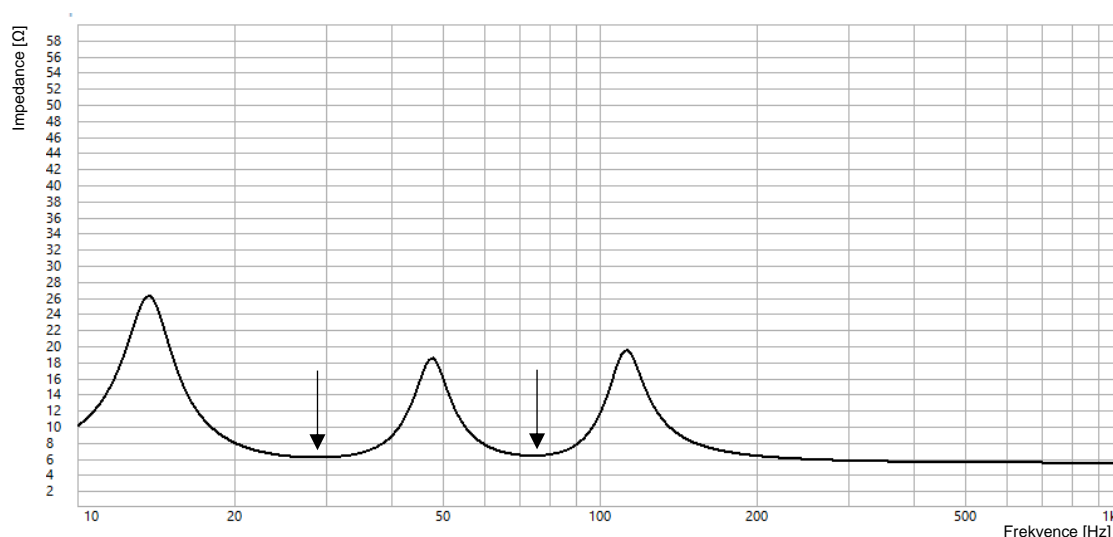
Základní princip konstrukce je vyobrazen na Obr. 2-12. Opět se jedná o ozvučnici se dvěma komorami s určitým poměrem objemu komor, avšak vnášíme do systému další rezonanci v podobě druhého bassreflexového nátrubku.



Obr. 2-12 Band pass ozvučnice 6. řádu

Oproti ozvučnici 4. řádu využíváme i akustický výkon vyzářený zadní stranou membrány reproduktoru, tudíž v dobrém případě dojde k nárůstu citlivosti, v praxi o 1 až 2 dB. Zadní komora bude mít větší objem než přední a poměr objemů komor se často volí cca 2/3. V podstatě se jedná o dvě bassreflexové ozvučnice laděné na určitý kmitočet, přičemž zadní komora je laděna na nižší kmitočet. Je zde problém, že se navzájem ovlivňují, proto může být návrh tohoto typu ozvučnice složitý.

Kmitočtová charakteristika bude mít stejný průběh jak u předešlé ozvučnice 4. řádu s rozdílem teoretické dolní strmosti, která činí 20 dB/oct., v praxi mají dolní i horní strmost stejnou a to 18 dB/oct. Můžeme vycházet z červeně vyznačených průběhů ze sady charakteristik z Obr. 2-10. [2]



Obr. 2-13-Impedanční charakteristika bandpass 6. řádu

Velký rozdíl nastane u impedanční charakteristiky, přidali jsme další rezonanci, přičemž ladíme nátrubek přední i zadní komory. Výsledkem jsou tři impedanční maxima

na charakteristice, a jak víme, tak mezi jednotlivými maximy se nachází sedlo neboli minimum, to představuje ladící kmitočet nátrubku. Názorně je to vidět na Obr. 2-13, kde jsou tyto ladící kmitočty vyznačeny šipkou. [3]

Jak jsme zjistili, návrh je složitý a závisí na více aspektech, které nemusíme umět ovlivnit. Už jen pro návrh je potřeba použít vhodný simulační software a pokusit se získat co nejlepší parametry kmitočtové charakteristiky, ať to jsou citlivost, umístění pásma na frekvenční ose a zvlnění průběhu charakteristiky. Jestliže se nám podaří vytvořit vhodný návrh pro dané použití, pak následuje konstrukce, která musí být přesná, protože i malá změna rezonančních kmitočtů může rozladit celou ozvučnici, a tak změnit výsledek. Po konstrukci je vhodné doladit případné rezonance pomocí měření.

2.6 Ozvučnice typu transmission-line

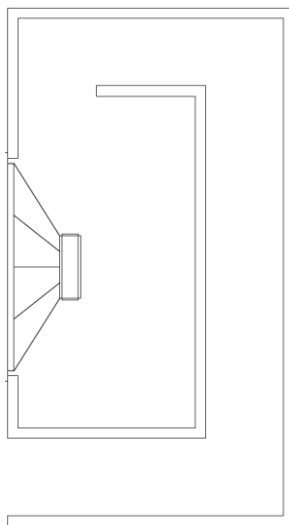
Nyní se podíváme na speciální typ ozvučnice. Jsou to ozvučnice, které mají tvořený zvukovod konstrukcí skříně. Může se tedy zdát, že se jedná o basreflexovou ozvučnici, kdy zvukovod představuje bassreflexový nátrubek. Jedno je obou ozvučnice stejné, a to využití výkonu vyzářeného zadní membránou reproduktoru pomocí nátrubku či zvukovodu. [2]

Principem této ozvučnice, respektive zvukovodu je zpozdít signál vyzářený zadní membránou reproduktoru tak, aby byl vycházející signál ve fázi se signálem vyzářeným přední stranou membrány. Pro výpočet délky zvukovodu použijeme vztah

$$l = \frac{\lambda}{k} = \frac{c_0}{k \cdot f_m}, \quad (2.24)$$

Kde $k = 1, 2, 4, \dots$

Zvukovod musí mít délku odpovídající půlplně nebo čtvrtplně dolního či mezního kmitočtu. [4]



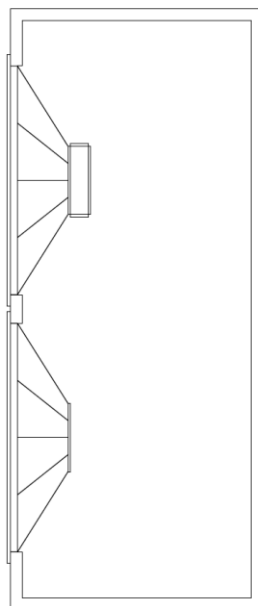
Obr. 2-14-Konstrukce ozvučnice typu transmission-line

Příklad konstrukce této ozvučnice je vyobrazen na Obr. 2-14. Z obrázku je také vidět, že konstrukce je náročná na objem. Jelikož délka zvukovodu musí být při mezním kmitočtu např. 40 Hz cca 2,13 m a se zachováním konstantního průřezu bude skříň dosti objemná. Průřez zvukovodu musí být dostatečně velký, aby vlivem jeho délky nedocházelo k velkému tlumení nebo v nejhorším případě k rušivým zvukům vlivem proudění vzduchu. Vhodné reproduktory pro použití v tomto typu ozvučnic jsou reproduktory s malým Q_{ts} , tedy okolo 0,2. Ozvučnice patří k těm složitějším, hlavně co se týče výpočtu, pro nás to je pouze výpočet délky nátrubku, ale v praxi je řešení této problematiky dosti obtížné. Setkáme se s ní pouze v aplikaci PA techniky, pro HiFi či zařízení používané v malých prostorech není vhodná.

2.7 Ozvučnice s pasivním zářičem

Pomocí aplikace pasivního zářiče jsou tvořeny některé HiFi reprosoustavy, kdy jsou vizuálně tři stejné akustické měniče, avšak jeden z nich je právě pasivní zářič.

Pasivní zářič je konstrukčně stejný jako basový reproduktor, neobsahuje však magnetický obvod a kmitací cívku, přičemž jeho hlavními parametry jsou poddajnost kmitacího ustrojí c_{ms} a hmotnost m_{ms} . Pasivní zářič pracuje na stejném principu jako bassreflexový nátrubek, oba vnášejí do systému další poddajnost a tím i rezonanci.



Obr. 2-15- Konstrukce ozvučnice s pasivním zářičem

Konstrukce ozvučnice je na Obr. 2-15. Oproti bassreflexové ozvučnice má větší strmost poklesu charakteristiky. Pro tento účel je vhodné použít reproduktory s Q_{ts} do 0,5. [2]

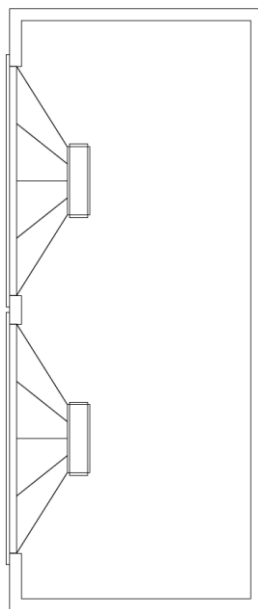
3. OZVUČNICE S VÍCE REPRODUKTORY

Pro zvýšení akustického výkonu reprosoustavy je vhodné použít více reproduktorů v jedné skříni. Umístění reproduktorů může mít více podob pro různé účely, které rozhodují o využití vhodných parametrů. Reprodukory se mohou umístit standartně, kdy je více reproduktorů na společné desce. V druhé řadě to je izobarická konfigurace, přičemž dva reproduktory mezi sebou svírají konstantní objem. Některé zapojení jsou vhodně zejména pro použití v subwooferech.

3.1 Standartní konfigurace-dva reproduktory

Nejčastější zapojení reproduktorů, do všech typů reprosoustav, nejčastěji však do uzavřené, bassreflexové a ozvučnice s pasivním zářičem. Hlavní výhodou tohoto zapojení je, že jej může využít na vyšší kmitočty, než jsou u subwooferů, protože obě membrány směřují ven přední stranou membrány.

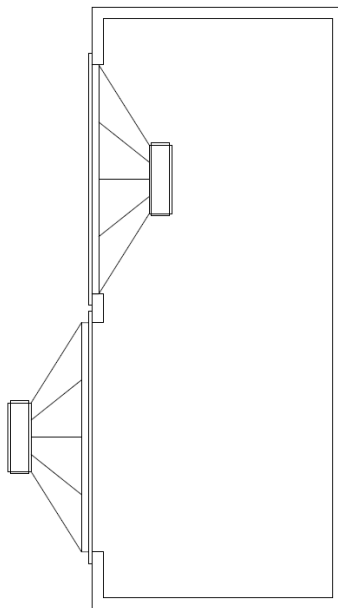
Přidáním druhého reproduktoru zdvojnásobíme výkon reprosoustavy a zároveň se zvýší i citlivost o 3 dB. Abychom docílili stejného kmitočtové charakteristiky, musíme zdvojnásobit i objem ozvučnice V_b , jelikož ekvivalentní objem reproduktorů V_{as} bude také dvojnásobný. Počet reproduktorů může být libovolný, ale vzhledem ke spojování impedancí, respektive vytváření sériového, paralelního nebo sérioparalelního zapojení je potřeba dodržet sudý počet. Umístění reproduktoru v ozvučnici je na Obr. 3-1. [2]



Obr. 3-1-Dva reproduktory v ozvučnici

3.2 Push-pull konfigurace

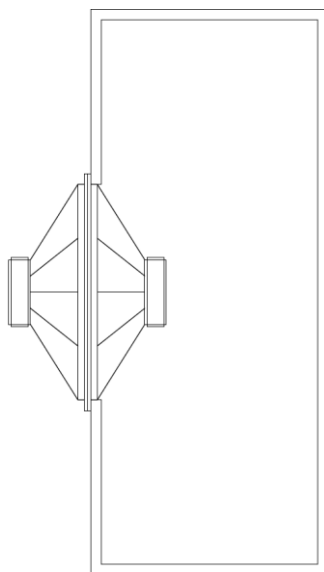
Stejně jako v předešlé konfiguraci dojde ke zvýšení citlivosti a zvětšení V_{as} . Jeden z reproduktoru je obrácen, tudíž jeho přední strana membrány směřuje do ozvučnice, proto je třeba u jednoho reproduktoru obrátit polaritu. Výhodou této konfigurace je snížení zkreslení, jelikož dojde k výrazné minimalizaci sudých harmonických, pokud uvažujeme stejné nelinearity magnetického pole v magnetických obvodech. Konfigurace je na Obr. 3-2. [2]



Obr. 3-2-Dva reproduktory v ozvučnici – push-pull

3.3 Konfigurace front to front – push-pull

Jedná se o izobarickou konfiguraci, kdy reproduktory mezi sebou svírají konstantní objem. Reproductory jsou k sobě připevněny předními stranami, proto je třeba u jednoho opět obrátit polaritu. Jedná se o push-pull zapojení, jehož výhodou je nízké zkreslení. Další výhodou je menší, poloviční objem skříně pro dosažení stejné kmitočtové charakteristiky. Nevýhodou je snížení charakteristické citlivosti o 3 dB. Konfigurace se nejčastěji používá v ozvučnicích typu band-pass nebo bassreflex. Konfigurace je na Obr. 3-3.

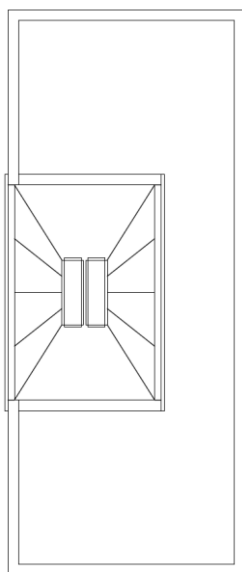


Obr. 3-3-Dva reproduktory v ozvučnici front to front – push-pull

3.4 Konfigurace back to back – push-pull

Opět se jedná o izobarickou konfiguraci, ale tentokrát reproduktory mezi sebou svírají větší objem, jak je znázorněno na Obr. 3-4. Reproductory musí mít vytvořenou malou sub ozvučnici, nejlépe válcového tvaru, aby byl svíraný objem, pokud možno co nejmenší. Zvukový efekt je téměř stejný jako v předešlé konfiguraci. [2]

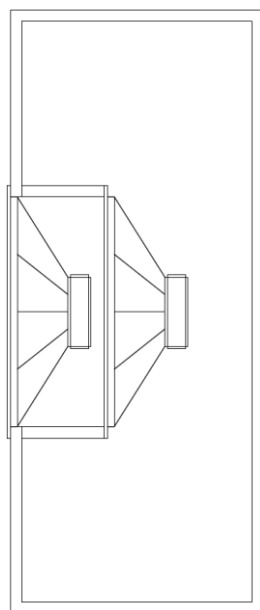
Zásadní nevýhodou je špatné chlazení reproduktorů, jelikož většina tepla je z kmitacích cívek odvedena právě do malého prostoru mezi reproduktory, který není nijak odvětráván. V případě použití reproduktorů s neodymovými reproduktory to může mít fatální dopad na životnost magnetů vlivem tepelného namáhání.



Obr. 3-4-Dva reproduktory v ozvučnici back to back – push-pull

3.5 Konfigurace piggyback

Poslední typ izobarické konfigurace, kdy reproduktory mají opět svou sub ozvučnici, ale jsou umístěny ve stejném směru tudíž nejsou minimalizovány sudé harmonické. Vzniklý prostor mezi reproduktory tak může být menší jak u předešlé konfigurace a je vyhříván pouze jedním reproduktorem. Stejně jako u všech izobarických konfigurací bude objem ozvučnice poloviční, avšak i pokles citlivosti o 3 dB. [2]



Obr. 3-5-Dva reproduktory v ozvučnici-piggyback

4. KONSTRUKCE OZVUČNIC

Jednou z podstatných záležitostí je dobrý návrh a následná konstrukce reproduktorových ozvučnic neboli skříní. Skříně musí splňovat určité parametry, které se projeví na výsledném zvuku reprosoustav. Jejich význam je popsán výše u jednotlivých typů ozvučnic.

Výrobu provádíme z vhodných materiálu s dostatečnou tuhostí, opracovatelnosti a druhu materiálu dle nároků na použití. Dodržení potřebné tuhosti skříně je velmi důležité, má velký vliv na vlastní rezonanci skříně, které je potřeba zamezit. U malých skříní postačí použít materiál s dobrou tuhostí a tlumením, u větších skříní je potřeba použít vhodné vyztužení.

S vyztužením skříně se to však nesmí přehnat, úkolem je zamezit šíření zvukových vln ve velkých plochách skříně, které rezonují určitým kmitočtem a ten se podepisuje na výsledném charakteru zvuku reprosoustavy. Jako dobré vyztužení můžeme použít např. žebrování po délce stěn. [2]

4.1 Konstrukční materiály

Tedy k samotným druhům materiálů. Nejpoužívanějšími materiály jsou dřevěné, respektive materiály z dřevěných produktů, dále také plasty a málo používaný kámen a beton. Materiál je potřeba zvolit podle toho, jak jsou výsledné reprosoustavy využívány, respektive aby odolávali podmínkám, ve kterých jsou používány.

4.1.1 Dřevotřísková deska – DTD

V dnešní době nejpoužívanější materiál na výrobu jak nábytku, tak i reprosoustav. Jedná se zároveň o nejlacinější materiál, protože se vyrábí z dřevěného odpadu, který je rozemletý na třísky a následně lisován. Desky mohou být bez povrchové úpravy tzv. surové desky, nebo laminované různými vzory či imitací dřeva. Desky nemají velkou tuhost, jelikož mezi třískami jsou vzduchové mezery, velmi záleží na výrobcích. Nejsou odolné proti vlhkosti, při kontaktu s vodou, hlavně v řezu či nechráněných místech bobtnají a mění svůj tvar i pevnost, proto nejsou vhodné do venkovních prostorů. Obecně je to materiál používaný u komerčních systémů.

4.1.2 Medium density fibreboard – MDF

Materiál s velmi jemnou strukturou, neboť dřevo je rozemleto na jemný prach a následně lisováno společně s pojivem, mají tedy velkou hustotu. Desky mají velmi dobré tlumení a zároveň tuhost, pevnost však není moc velká, jsou křehké a náchylné na zlomení. Díky dobré tuhosti a tlumení je to vhodný materiál pro konstrukci HiFi

reprosoustav, u kterých se nepředpokládá časté přemísťování a používání ve venkovních prostorech.

4.1.3 Překližky – PDP

Jsou to lepené pláty dřeva ve více vrstvách, přičemž vrstvy jsou proložené opačným směrem, takto je zaručena velká pevnost a pružnost. Překližka nemá tak dokonalé tlumení jako MDF, ale špatně na tom není. Díky její pevnosti a odolnosti vlhkosti je vhodná pro výrobu profesionálních reproboxů, zejména pak v odvětví PA. Vlastnosti překližky jsou pochopitelně závislé na použitém dřevu. Ty nejlepší jsou březové nebo dubové překližky, ty jsou ovšem finančně nákladné, mezi lacinější pak patří například topolová překližka.

4.1.4 Plast – ABS

Plast je nejčastěji využíván u stojanových satelitů, které musí mít malou hmotnost a potřebný tvar. Ozvučnice jsou dobře reprodukovatelné, jestliže se používají vstřikovací formy a podobně. Ve spojích může rezonovat. [2]

4.1.5 Beton

Velmi málo používaný materiál, jen ve zvláštních případech už jen kvůli špatnému zpracování. Ale co se týče vlastností, tak má velmi dobrou tuhost a velmi dobré tlumení. I malé skříně jsou velmi těžké. [2]

4.1.6 Další materiály

Málokdy se pro výrobu skříní používá kámen, který je velmi tvrdý, a proto rezonuje neboli zvoní, proto je třeba zvonivost tlumit. U válcových ozvučnic se využívá injektovaná celulóza, která má dobrou tuhost. [2]

4.2 Spojování stěn

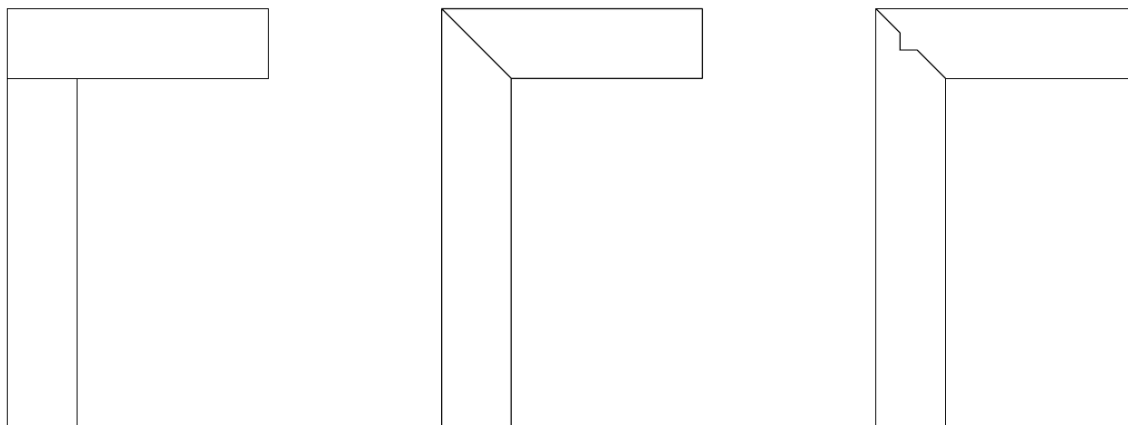
Dle účelu použití reprosoustav musíme použít vhodný způsob spojování jednotlivých stěn skříně. Jak už podle mechanického namáhání, tak i dle estetického hlediska.

Spojování stěn je rozděleno do několika způsobů a vychází z [2].

- **Natupo** – desky jsou řezané pod úhlem 90 °, vznikne viditelná hrana s kolmým řezem, je třeba dále použít vhodnou povrchovou úpravu. Je vhodné použít hranol na zpevnění spoje.
- **Na pokos** – desky jsou řezané pod úhlem 45 °, díky šikmému řezu vznikne větší plocha pro následné lepení. Opět je vhodné použít hranol na zpevnění.

- **Na pokos se zámkem** – pro řez musíme použít speciální frézu nebo CNC, aby byla zajištěna přesnost. Velmi pevný spoj

Jestliže je potřeba zajistit ještě větší pevnost spoje, je vhodné použít ke spojení kolíky, vyztužovací hranol, péro nebo šrouby, které j třeba následně zapravit. K lepení spojů dřevěných desek je vhodné použít disperzní nebo polyuretanové lepidlo. Hrany je vhodné opatřit zkosením, však nejlépe zaoblením, při požití vhodného konstrukčního materiálu a povrchové úpravy budou hrany odolné proti mechanickému poškození.



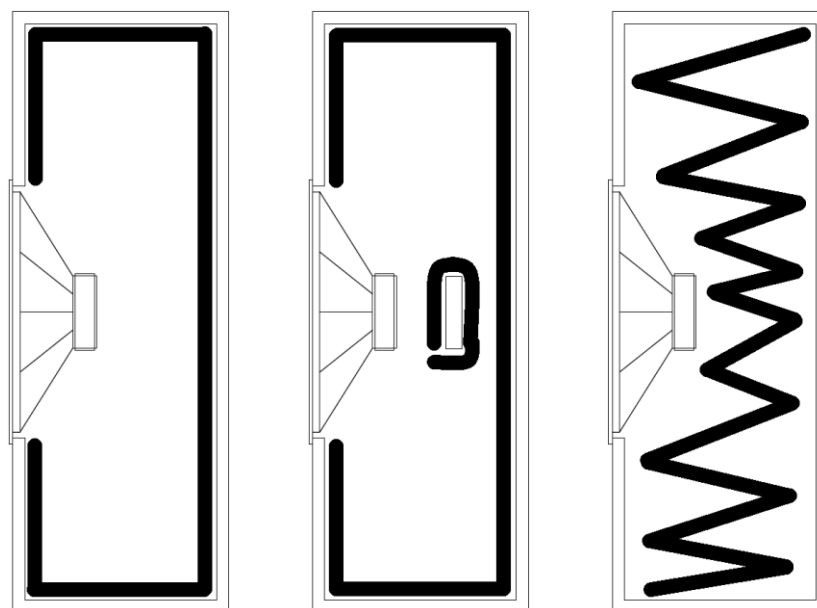
Obr. 4-1-Typy spojů stěn na tupo, na pokos a na pokos se zámkem

4.3 Tlumení ozvučnice

Tlumení ozvučnic je důležité, protože uvnitř vzniká stojaté vlnění, krému je třeba zamezit. Vyztužením, jež je uvedené výše zvyšujeme tuhost stěn skříně čímž redukuje vlastní rezonance. Každá reprosoustava má svůj objem a tvar, kterým je tvořen jistý sloupec vzduchu, kterým se šíří vlna a následně se odráží a vzniká tak stojatá vlna. Tlumení ozvučnice můžeme provést třemi způsoby. [2]

Tlumicí materiál umístíme lepením na stěny ozvučnice, kromě přední strany, kterou vynecháváme. Používají se vhodné materiály, jako je tlumicí rouno nebo speciální materiály s vysokou pohltivostí. Existují různé alternativy, důležité je, aby byl použitý materiál prodyšný. Většina reprosoustav je tlumena tímto způsobem. Dalším způsobem je tlumení na výztuhu, tlumicí materiál umístíme jak na stěny ozvučnice, tak i na příčné výztuhy mezi stěnami. Posledním tlumením je metoda zig – zag, jedná se o velmi účinnou metodu, materiál je vkládán do objemu skříně například dle Obr. 4-2.

S tlumením se to nesmí přehnat, přetlumením se snižuje činitel jakosti ozvučnice, to může způsobit rozladění navrženého systému. Obzvláště bassreflexové ozvučnice jsou náchylné na přeladění. Tlumení nesmí bránit průtoku vzduchu u bassreflexových nátrubků i okolo reproduktorů. [2]



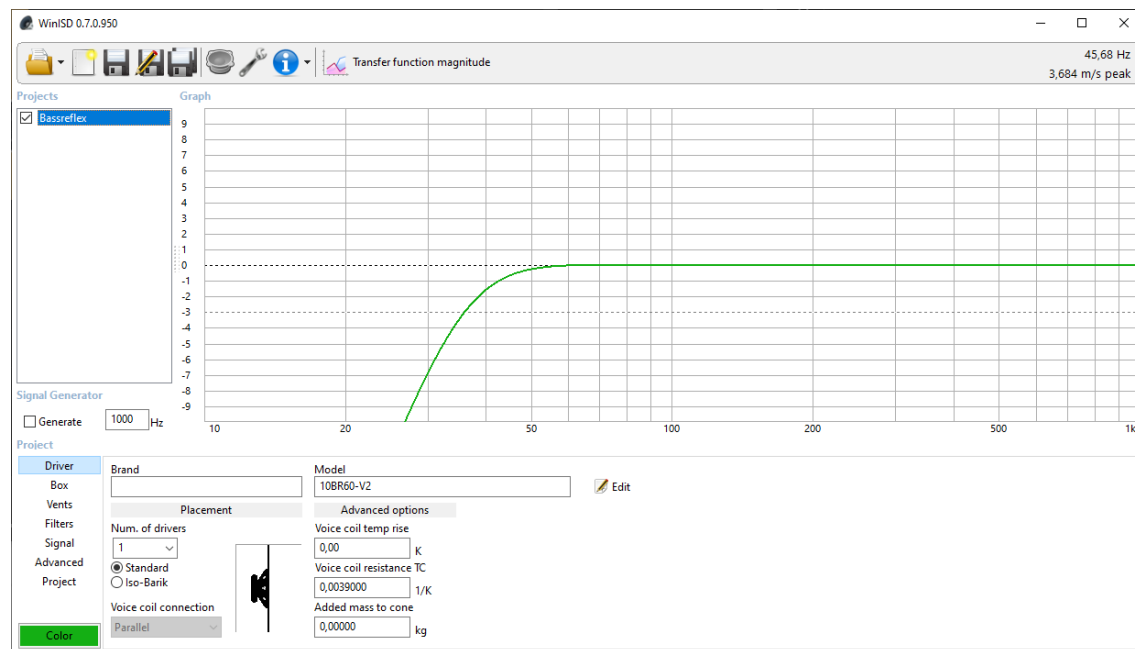
Obr. 4-2-Způsoby tlumení ozvučnic na stěny, na výztuhu a zig-zag

5. SW PRO NÁVRH, SIMULACI A MĚŘENÍ

Ozvučnice si můžeme navrhnout sami početně, jak je řešeno v 2. kapitole, jednoduše je to možné u uzavřené a bassreflexové ozvučnice, nemluvě o výše uvedených jako jsou desková a otevřená. U další ozvučnic by byly výpočty natolik složité, že je vhodné použít nějaký program na návrh a simulaci. Programů je spousta, některé jsou však jednodušší, které po zadání jistých parametrů vypočtou délku bassreflexového nátrubku. Ty složitější, respektive podrobnější jsou schopny vykreslit i grafy např. amplitudové a impedanční charakteristiky. Budeme se zabývat pouze jedním programem, a to programem WinISD.

5.1 WinISD

Historie programu se píše od roku 1997 a poslední verze vyšla v roce 2016. Je to velmi praktický program, pomocí kterého jsme schopni vytvořit kompletní návrh ozvučnic uzavřené, bassreflexové, bandpass 4. a 6. řádu a ozvučnici s pasivním zářičem. Program má vlastní databázi reproduktorů, kde jsou uvedeny veškeré potřebné parametry pro návrh, nabízí i možnost přidání nových reproduktorů, které v databázi nejsou. Dále disponuje výhodnou funkcí, kterou je možnost vykreslení průběhů amplitudové, impedanční, fázové charakteristiky, ale i rychlosti proudění vzduchu v nátrubku. Výhodou je také možnost otevření více projektů zároveň, můžeme pak srovnávat i průběhy charakteristik.



Obr. 5-1-Okno programu WinISD

5.1.1 Postup návrhu

Jestliže máme reproduktor, který se nachází v databázi programu, můžeme jej vybrat a dále program nabízí možnost výběru počtu reproduktorů, a to v normální a izobarické konfiguraci. Dalším krokem je výběr ozvučnice, pokud však nevíme, do které ozvučnice je reproduktor vhodný, před tímto výběrem nám program vypočte činitel EBP, o kterém je psáno v kapitole 2.4. V posledních krocích zvolíme vhodnou aproximaci, která určuje možnou výšku „hrbu“ na amplitudové charakteristice a název projektu. Následně bude vypočten objem ozvučnice a další hodnoty dle typu ozvučnice. Vypočtené hodnoty, jakožto objem, rezonanční kmitočet či průměr nátrubku u bassreflexové ozvučnice můžeme podle potřeby měnit, a měnit tak výslednou amplitudovou a impedanční charakteristiku.

5.2 Měření parametrů reproduktorů

Existuje pár způsobů, jak zjistit TS nebo i podrobnější parametry neznámého reproduktoru. Pokud chceme navrhnout ozvučnici, musíme znát alespoň TS parametry, mezi které patří celkový činitel jakosti Q_{ts} , f_s a V_{as} . Pomocí nich jsme schopni podle návrhu ozvučnic uvedeného výše spočítat potřebné parametry pro konstrukci ozvučnic. Je potřeba zajistit potřebnou přesnost parametrů, aby byl i návrh přesný.

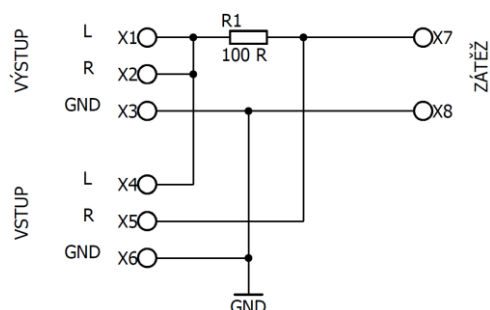
U nových reproduktorů jsou veškeré parametry udány výrobcem v katalogovém listu. Jestliže chceme navrhovat ozvučnici na reproduktor jehož parametry neznáme, nebo známe ale reproduktor je již dlouho používaný a opotřebený, musíme nějak zjistit aktuální hodnoty. U nás je spousta firem a soukromníků, kteří se zabývají opravou reproduktorů, ti profesionálnější ke službě nabízejí i měření těchto parametrů. Zjistěte nabízejí i pouze změření parametru, ale určitě za nějaký finanční obnos. Nabízí se i možnost tohoto měření v domácích podmínkách za použití vhodného softwaru.

Pro účel měření parametrů reproduktoru je vhodný jeden z dostupných programů s názvem „ARTA software“. Jedná se o balíček, který obsahuje tři podprogramy zvané Arta, Steps a Limp. Program Arta se používá pro měření impulzní odezvy a pro analýzu spektra v reálném čase a měření frekvenční odezvy. Dále Limp slouží pro měření frekvenční odezvy s krokovým sinusovým buzením. Současně s měřením frekvenční odezvy program odhaduje úrovně harmonického zkreslení 2., 3., 4., 5. a vyššího řádu. A třetí program Limp je ten, který budeme používat pro měření parametrů reproduktoru, respektive o odhad jeho parametrů. Původ softwaru je z Chorvatska. [5]

5.2.1 Program Limp

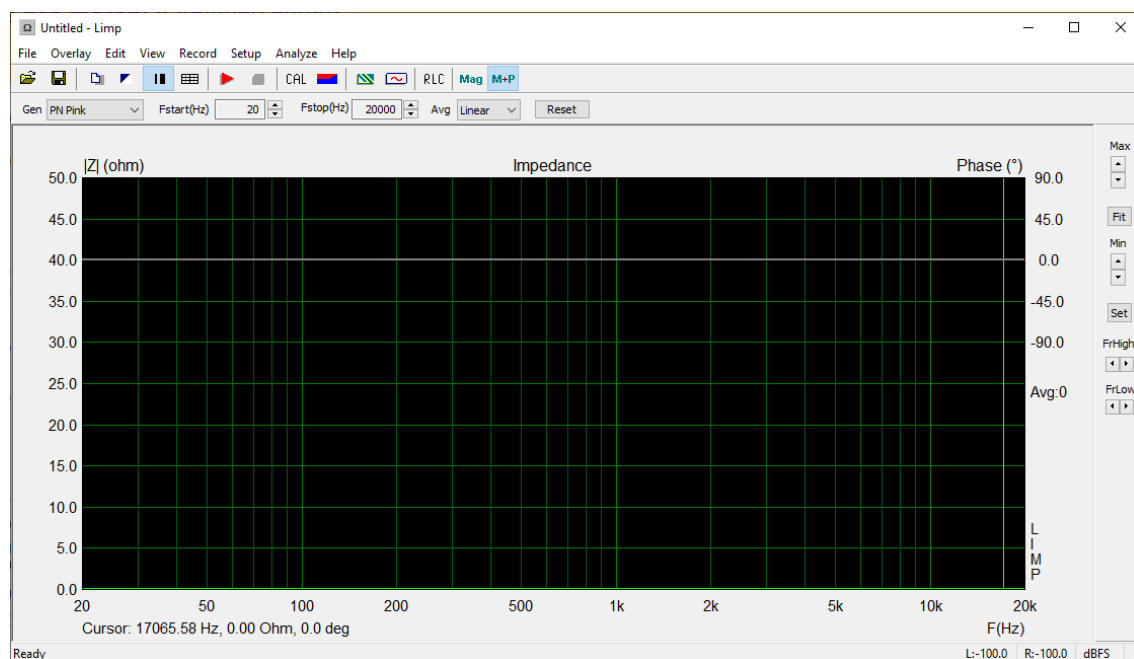
V této kapitole se řeší měření parametrů reproduktoru, proto budeme řešit pouze program Limp. Program je placený, avšak lze s omezením použít v demo verzi, kdy omezení spočívá v nemožnosti uložení projektu výsledného měření, to však nijak nebrání

získání parametrů. Budeme potřebovat zvukovou kartu, která je opatřena line vstupem a pochopitelně výstupem. Dále si musíme od výrobce programu koupit připojovací terminál. Připojovací terminál si můžeme bez problému vyrobit i doma, schéma zapojení a potřebné součástky jsou uvedeny ve schématu na Obr. 5-2. [6]



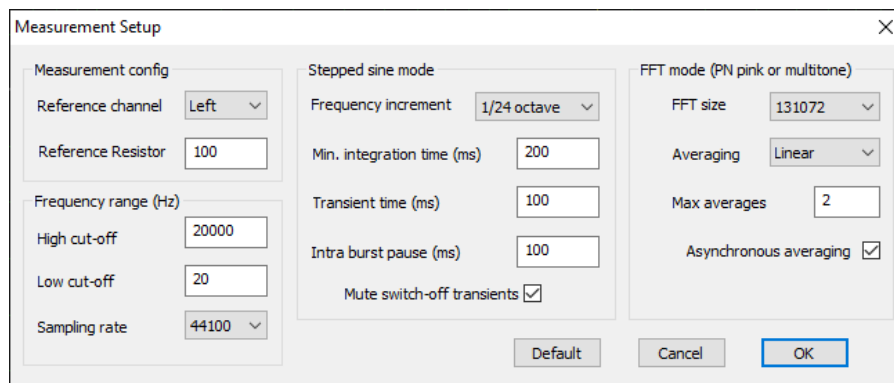
Obr. 5-2-Schéma zapojení obvodu pro připojení ke zvukové kartě

Při výrobě připojovacího terminálu je potřeba použít kvalitní součástky a přívodní kabely, aby bylo měření, co možno nejpresnější. Kvalitní konektory, rezistor s přesností 0,1 % a kabely s průřezem alespoň 0,75 mm², je vhodné taky použít spletenec ze čtyř žil, abychom snížili indukčnost přívodů k reproduktoru. Konce kabelu můžeme opatřit nějakými krokodýlky nebo jinými konektory pro snadné připojení reproduktoru, ale nesmí být vytvořen přechodový odpor, který by ovlivnil impedanční charakteristiku. [6]



Obr. 5-3-Okno programu Limp

Před samotným měřením je potřeba změnit nastavení v programu, musíme zadat hodnotu předřadného rezistoru ze schématu na Obr. 5-2. Podle potřeby nastavit kmitočtový rozsah měření, nejčastěji však 20 Hz až 20 kHz s vzorkovacím kmitočtem 44,1 kHz. Další funkce Stepped sine mode a FFT mode nastavit dle Obr. 5-4. [6]



Obr. 5-4-Nastavení pro měření

Pokud používáme více zvukových zařízení, musíme nastavit v Audio devices správné výstupní a vstupní zařízení, které bude pro měření používáno.

Vlastní měření není nijak obtížné, je však třeba se naučit postup měření a pochopit, co vlastně měříme. Měřit můžeme pomocí tří metod, a to metodou uzavřené ozvučnice, metodou přidané hmotnosti a metodou fixní hmotnosti. K měření bude stačit pouze jedna metoda, jako nejsnadnější a zároveň nejpřesnější se jeví metoda přidané hmotnosti. Metoda je založena na změně rezonančního kmitočtu reproduktoru přidáním hmotnosti. Nejprve je změřena impedanční charakteristika samotného reproduktoru, poté se na membránu reproduktoru, nejlépe na vrchlík přilepí závaží s přesně známou hodnotou hmotnosti. Změnou hmotnosti kmitacího systému reproduktoru dojde ke změně hodnoty parametru m_{ms} , jehož hodnota se zvýší a tím se sníží rezonanční kmitočet. Se známou hodnotou a změny rezonančního kmitočtu program vypočte ostatní parametry reproduktoru.

Závaží by mělo mít velkou tuhost, může být vyrobeno z kovu, ale ne feromagnetického, jelikož se bude nacházet v blízkosti magnetického pole. Použijeme tedy diamagnetický nebo paramagnetický materiál jako je hliník nebo měď, můžeme také použít mince, které mají definovanou hmotnost na setinu gramu. Hmotnost závaží volíme podle velikosti reproduktoru, do průměru 10 cm postačí závaží 5 g do 20 cm použijeme 15 g. U větších reproduktorů se hmotnost závaží volí individuálně, ve výsledku je potřeba, aby se rezonanční kmitočet změnil cca o 30 %. [6]

5.2.2 Postup měření

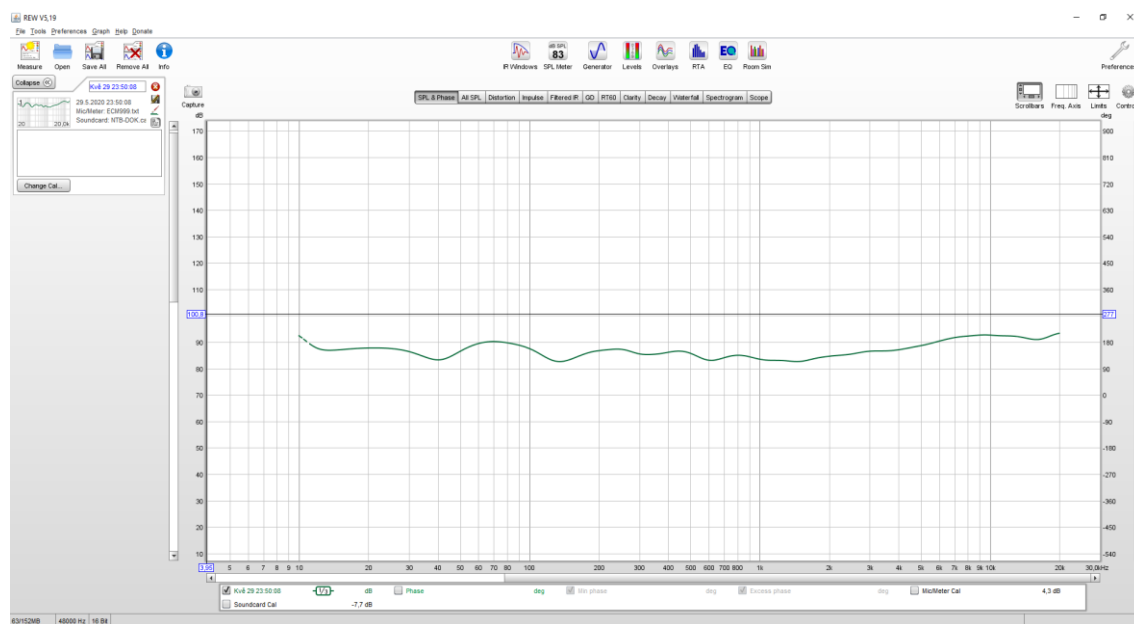
Po vytvoření připojovacího terminálu, nastavení programu dle výše uvedeného postupu a vytvoření vhodného závaží se může pustit do měření.

Po připojení reproduktoru spustíme první měření impedanční charakteristiky červeným tlačítkem na liště funkcí, poté proběhne měření a čekáme na výslednou charakteristiku. Následuje druhé měření s přidanou hmotností, proto na reproduktor přilepíme oboustrannou páskou vytvořené závaží, v menu liště v záložce „Overlay“

zaklikneme „Set as overaly curve“, a opět spustíme měření. Vykreslí se druhý graf s posunutým rezonančním kmitočtem. Posledním krokem bude získání potřebných parametrů. V menu v záložce „Analyze“ otevřeme okno „Added mass method“, kde zadáme průměr reproduktoru, do kterého se započítává i 1/3 šířky závěsu a hmotnost závaží. Klikneme na tlačítko „Calculate parameters“ a parametry reproduktoru se vzápětí objeví.

5.3 Měření kmitočtové charakteristiky

Pro měření kmitočtové charakteristiky je možno použít bezplatný software „Room EQ Wizard“ psáno zkratkou „REW“. Jedná se o mnoho účelový software, jehož hlavní prioritou je právě měření kmitočtové charakteristiky za pomoci RTA. Jeho další nepochybně důmyslnou funkcí je ekvalizér. Už z názvu softwaru je zřejmé, že se jedná o ekvalizér místnosti. Každá místnost má svou akustiku, a ta může měnit parametry průběhu kmitočtové charakteristiky v místě poslechu od reprosoustav. Pomocí softwaru je v místě poslechu změřena kmitočtová charakteristika, podle které se nastavuje ekvalizér, respektive více ekvalizérů, čímž je vytvořen profil pro poslechový bod.



Obr. 5-5 Hlavní okno softwaru REW

Na Obr. 5-5 je zobrazeno hlavní okno programu s příkladem změřené kmitočtové charakteristiky. Dalšími funkcemi je například generátor signálu, SPL metr, RTA, zmíněný ekvalizér a simulátor místnosti. SPL metr je také dobrá funkce, která nalezne využití, ale zde slouží spíše pro kalibraci, ke které je potřeba kalibrovaný měřicí přístroj hluku. Generátor se také hodí, umí generovat šum a tony typu sweep. Další funkcí, která stojí za představení je simulátor místnosti. Simulátor slouží k ukázce akustických problémů, které mohou nastat při umísťování reprosoustav nebo subwooferů

v místnostech. Zvolí se rozměry simulované místnosti, umístění reprosoustav či subwooferu a místa poslechu, pak je simulována frekvenční charakteristika v místě poslechu na nízkých kmitočtech, do 200 Hz.

K měření, pomocí RTA, se používá vhodný měřicí mikrofon, nejlépe však mikrofon s kalibračním souborem, který se dá do programu nahrát a měřená kmitočtová charakteristika je ve výsledku upravena pomocí kalibrace. Teoreticky je možné použít jakýkoliv mikrofon, ale musí být známa jeho kmitočtová charakteristika.

V této práci bude využita pouze funkce měření kmitočtové charakteristiky pro zhodnocení návrhu a konstrukce subwooferu.

5.3.1 Postup měření

Měření kmitočtové charakteristiky není nijak složité. Základem je nepochybně dobré vybavení, mezi které patří kvalitní zvuková karta s výstupem a vstupy, kvalitní mikrofonní předzesilovač s fantomovým napájením a kvalitní měřicí mikrofon. U předzesilovače je důležitý jeho přenos, tedy jeho kmitočtová charakteristika, aby nezkrášlovala výsledek měření, požaduje se naprosto rovná. O parametrech mikrofonu je psáno výše.

Před samotným měřením je nutné provést několik nastavení otevřením okna „preferences“, kde se nachází všechna důležitá nastavení od signálů po vzhled programu. Je třeba zvolit vstupní a výstupní zařízení z výběru. Vhodná je i kalibrace zvukové karty, respektive zvukové karty společně s předzesilovačem, jen tak se docílí přesných výsledků. Je zde i možnost vložení kalibračního souboru pro mikrofon, pokud je k dispozici. Poslední úkon před měřením je kalibrace SPL za pomoci kalibrovaného měřicího přístroje, ta se provede v okně „SPL meter“.

Otevřením okna „measure“ se provede nastavení měření, kde se volí počáteční a konečná frekvence, délka měření a kanály výstupu. Pak se už jen zkontroluje úroveň signálu „Check levels“ pro případnou korekci a může se měřit stisknutím „start measuring“. Po skončení měření se hned objeví kmitočtová charakteristika, pro lepší přehlednost křivky je dobré nastavit i vyhlazování.

6. VÝBĚR A MĚŘENÍ REPRODUKTORU

Výběr správného reproduktoru je velmi důležitý, posuzuje se podle použití výsledné reprosoustavy. Rozdílné reproduktory použijeme v aplikaci HiFi a PA. V HiFi se bude klást důraz na nízké zkreslení, šířku vyzářeného pásma, a tedy rovnost amplitudové charakteristiky, kdežto u PA ozvučení bude důležitý výkon a výsledný akustický tlak, přičemž musí být odolný vůči přetížení. Pro každou aplikaci se hodí jiný typ ozvučnice, v HiFi použijeme uzavřenou, bassreflexovou a ozvučnici s pasivním zářičem. V PA aplikaci se využívá taktéž bassreflexová ozvučnice, ozvučnice typu bandpass 4. a 6. řádu a různé specifické ozvučnice se zvukovodem. Pro každou ozvučnici jsou potřebné jiné parametry reproduktoru, respektive celkový činitel jakosti reproduktoru Q_{ts} , kde nižší hodnoty jsou pak vhodné do bassreflexových a vyšší hodnoty do uzavřených a bandpass ozvučnic.

O měření reproduktorů je psáno v kapitole č. 5.2. Měření bude prováděno za pomoci programu Limp. Je třeba brát zřetel i na parametry nového reproduktoru, výrobci sice přikládají k reproduktoru katalogové listy, ve kterých jsou uvedeny veškeré parametry, ale ne vždy jsou zcela pravdivé, hlavně co se týče parametrů charakterizujících kmitací ústrojí. Výroba jednoho typu reproduktoru může probíhat i po dobu desítky let, výrobní proces může být stále stejný, ale jakmile se použije trochu jiný materiál, ovlivní to výsledné parametry. Proto se tedy dá říct, že katalogový list uvádějící parametry reproduktoru odpovídá pouze dané sérii reproduktoru, dle které byly dané hodnoty změřeny. Pro nás to znamená práci navíc, kdy i nově zakoupený reproduktor je vhodné změřit, abychom mohli provést přesný návrh ozvučnice. Dále je třeba brát v potaz, že reproduktor nebude mít stále vlastnosti nového reproduktoru, kmitací ústrojí po čase používání změní své parametry. V případě měření nového reproduktoru je třeba před měřením reproduktor uvést do provozních podmínek, tj. vystavit ho po určitou dobu výkonovému zatížení, kdy výchylka membrány není nulová. Závěs a středící membrána reproduktoru se tak uvedou do pohybu a cívka bude zahřátá, čímž změní své parametry a simuluje tak provozní podmínky. Parametry udané v technické dokumentaci reproduktoru se mohou u různých výrobců lehce lišit, někdy mohou být totožné.

6.1 Volba reproduktoru

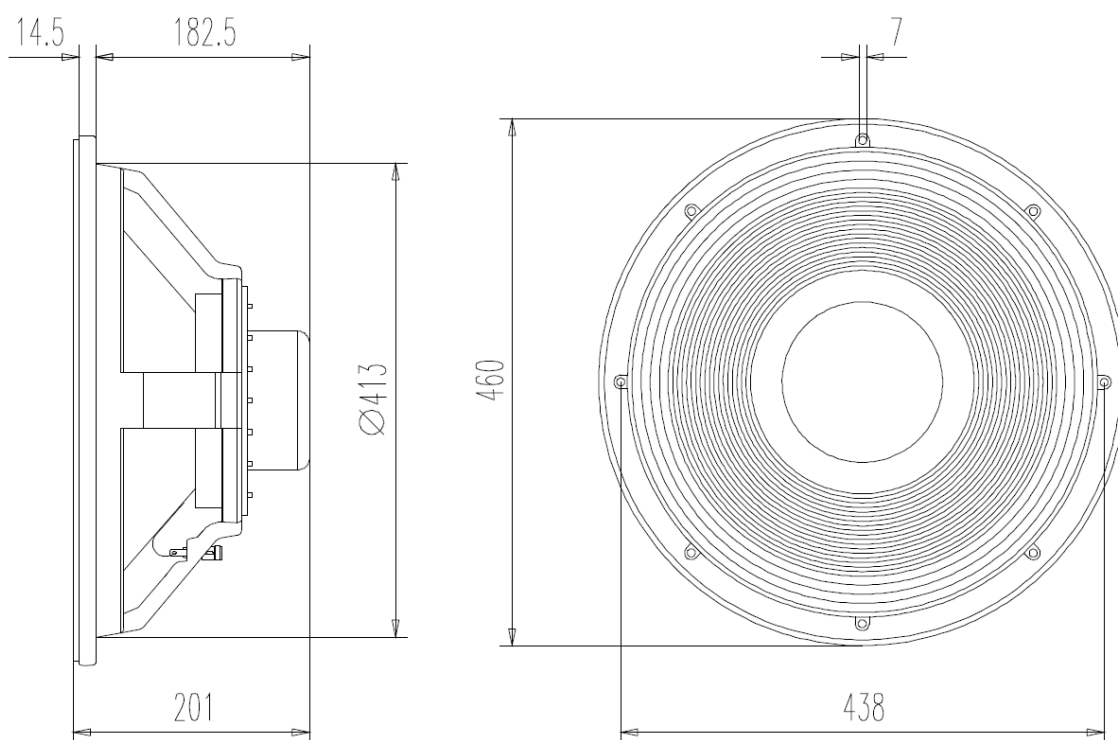
Dle zadání se bude navrhovat subwoofer pro použití v PA ozvučení, proto bude vybrán reproduktor vhodný svými parametry pro tuto aplikaci. Byl zvolen reproduktor o průměru 18 palců s výkonem 1000 W AES osazeným neodymovým magnetickým obvodem. Reproductor patří mezi profesionální reproduktory. Výrobce je firma Beyma a typové označení je 18P1000ND, jeho katalogové parametry jsou uvedeny na Obr. 6-1.

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Nominal diameter	460 mm. 18 in.
Rated impedance	8 ohms
Minimum impedance	6.2 ohms
Power capacity*	1000 w AES
Program power	2000 w
Sensitivity	98 dB 2.83v @ 1m @ 2 π
Frequency range	25 - 2000 Hz
Recom. enclosure vol.	80 / 200 l 2.8 / 7 ft. ³
Voice coil diameter	100 mm. 4 in.
Magnetic assembly weight	4.62 kg. 10.16 lb.
BL factor	24.3 N / A
Moving mass	0.195 kg.
Voice coil length	21 mm
Air gap height	12 mm
X damage (peak to peak)	52 mm

THIELE-SMALL PARAMETERS**

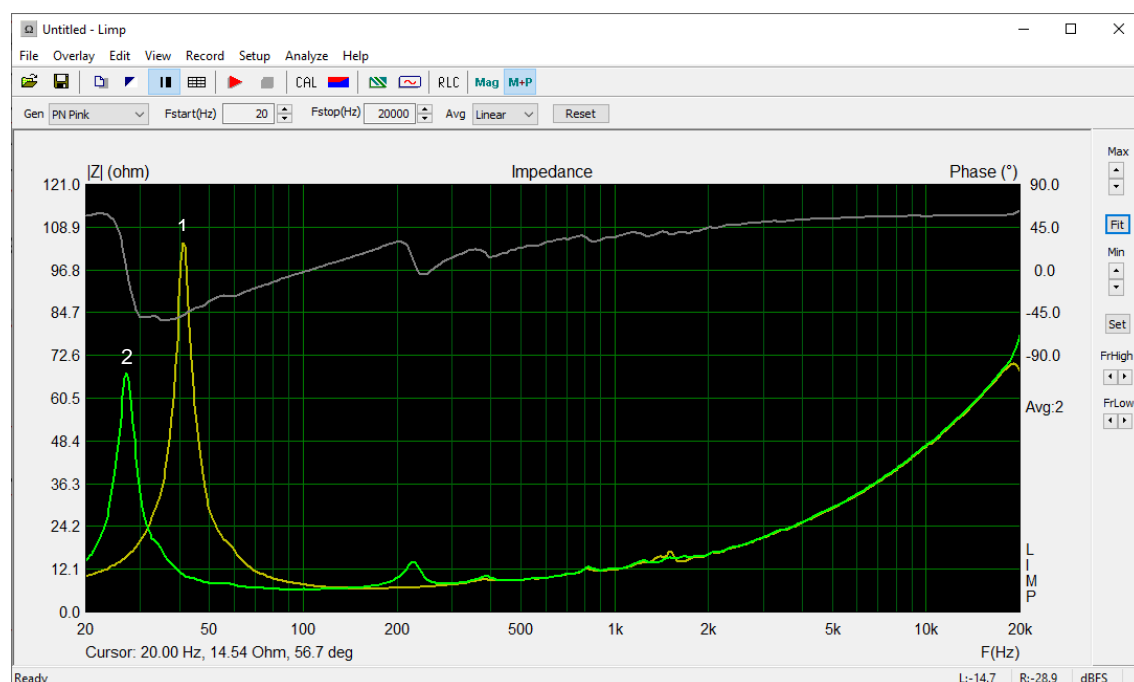
Resonant frequency, fs	40 Hz
D.C. Voice coil resistance, Re	5.1 ohms.
Mechanical Quality Factor, Qms	9.87
Electrical Quality Factor, Qes	0.43
Total Quality Factor, Qts	0.41
Equivalent Air Volume to Cms, Vas	178 l
Mechanical Compliance, Cms	80 μ m / N
Mechanical Resistance, Rms	5 kg / s
Efficiency, η_0 (%)	2.6
Effective Surface Area, Sd (m ²)	0.1250 m ²
Maximum Displacement, Xmax***	8 mm
Displacement Volume, Vd	1000 cm ³
Voice Coil Inductance, Le @ 1 kHz	2.8 mH

Obr. 6-1-Katalogové parametry reproduktoru 18P1000ND [7]**Obr. 6-2 Rozměry reproduktoru 18P1000Nd [7]**

Reproduktor je možno vidět na fotografiích, které jsou v příloze A. Na fotografii zadní strany reproduktoru je vidět magnet, který je poměrně dost malý, protože se jedná o neodymový magnet. Díky němu je reproduktor lehčí a ve výsledku i celá konstrukce s tímto reproduktorem.

6.2 Měření reproduktoru

Měření zvoleného reproduktoru bylo provedeno podle postupu uvedeného výše. V prvním kroku byl reproduktor vystaven výkonovému zatížení, byl použit sinusový signál o kmitočtu 30 Hz, aby byla membrána dostatečně vychylována a zároveň ohřívána kmitací cívka. Reprodukter byl umístěn do vodorovné polohy magnetem dolů, přičemž byl zachován dostatečný prostor okolo chladicího otvoru. Prvně byla změřena impedanční charakteristika bez přidané hmotnosti a následně bylo na reproduktor připevněno závaží o hmotnosti 235 g a poté změřena impedanční charakteristika s přidanou hmotností. Do programu byly vloženy hodnoty hmotnosti závaží, průměru membrány reproduktoru a stejnosměrného odporu cívky.



Obr. 6-3-Impedanční charakteristiky-měření

Na Obr. 6-3 jsou vykresleny impedanční charakteristiky měření bez přidané a s přidanou hmotností. Průběh č. 1 je charakteristika bez přidané hmotnosti a č. 2 s přidanou hmotností. Vypočtené hodnoty programem jsou uvedeny v Tab. 6-1.

Beyma 18P1000ND			
F_s	41,28 Hz	M_{ms}	188,96 g
R_e	5,00 Ω	R_{ms}	5,60 kg/s
L_e	555,54 μ H	C_{ms}	0,0787 mm/N
L_2	704,55 μ H	V_{as}	157,7 l
R_2	16,46 Ω	S_d	1194,59 cm ²
Q_t	0,42	Bl	23,58 Tm
Q_{es}	0,44	η	2,42 %
Q_{ms}	8,55	L_p	97,98 dB

Tab. 6-1-Změřené parametry reproduktoru

7. VOLBA OZVUČNICE

Profesionální reproduktory vybraného typu jsou ve většině případů užívané v bassreflexových ozvučnicích, respektive jejich parametry vyhovují pro aplikaci v bassreflexových ozvučnicích. Pochopitelně se jejich uplatnění může najít i v jiných typech ozvučnic, jako jsou ozvučnice typu bandpass nebo ozvučnice se zvukovodem.

Pro zvolený reproduktor je vhodná bassreflexová ozvučnice, pokud vycházíme z výše uvedeného rozboru problematiky této ozvučnice, jež je řešena v 2.4, kde je řešen činitel EBP. Tento činitel umožňuje rychle určit, zdali je reproduktor vhodný pro bassreflexovou ozvučnici. Pokud tento činitel vyjde větší jak 50 ($EBP > 50$) je možno daný reproduktor použít v bassreflexové ozvučnici. Z uvedených katalogových hodnot vybraného reproduktoru uvedených na Obr. 6-1 můžeme činitel vypočítat.

$$EBP = \frac{f_s}{Q_{es}} = \frac{40}{0,43} = 93,02 \quad (7.1)$$

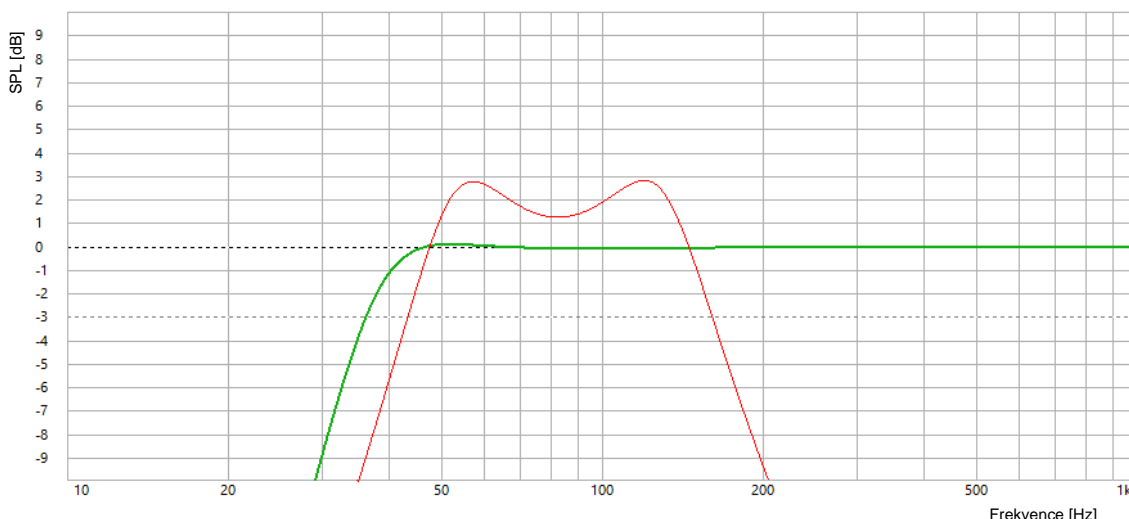
Dle výpočtu můžeme konstatovat, že je vybraný reproduktor do dané ozvučnice vhodný.

Úkolem je vybrat nejvhodnější ozvučnici pro subwoofer, získat nejnížší možné kmitočty a co možno nejvyšší citlivost. Za zvážení tedy stojí i již zmíněná ozvučnice typu bandpass, která bude hrát jen v určitém pásmu, což v použití subwooferu ničemu nevádí. Pro zjištění výhod a nevýhod každé z ozvučnic je vhodné provést simulaci, zejména kvůli frekvenční charakteristice. Výpočet lze také provést, avšak u ozvučnice bandpass velmi obtížně a zdlouhavě, těžko by se vykreslovala frekvenční charakteristika, kterou se budeme řídit v rozhodování výběru.

Jak je řešeno v teorii bassreflexové ozvučnice, je zřejmé, že v ideálním případě bude mít frekvenční charakteristika téměř „rovný“ průběh, respektive od počáteční strmosti bude mít konstantní intenzitu akustického tlaku. Bohužel v případě bandpass ozvučnice to tak není, zde v ideálním případě se jedná o křivku, která je z obou stran ohraničena jistou strmostí, jak je vidět na Obr. 2-10. V mnoha případech vznikne na křivce propad, který na ni vytvoří 2 vrcholy, „rovnost“ této křivky záleží na poměrech objemů komor a jejich rezonančních kmitočtů, a to souvisí s citlivostí výsledné reprosoustavy. Hlavní výhodou bandpass ozvučnice je o 3 dB vyšší citlivost v určitém kmitočtovém pásmu, v praxi to bývá o 2 dB. Je opravdu důležité vidět tento problém pomocí simulace, jelikož tato citlivost může být vyšší pouze na kmitočtovém pásmu o šířce 10-20 Hz, což může být v jistém kmitočtu velkou výhodou, ale pokud jsou tyto vrcholy na kmitočtové charakteristice špatně umístěné, vhodné to není, nebo je třeba použít ekvalizér.

7.1 Simulace

Pro vytvoření simulace je použit výše zmíněný software WinISD, Jsou zde vytvořeny dvě simulace pro porovnání, simulace kmitočtových charakteristik jsou vyobrazeny zároveň v jednom okně a je tak jednoduché určit rozdíly. Simulace je vytvořena pro ozvučnice bassreflex a bandpass 6. řádu, přičemž je zachován stejný vnitřní objem v obou případech a to přibližně 190 l.



Obr. 7-1 Simulace ozvučnice bassreflex a bandpass

Na vytvořené simulaci kmitočtové charakteristiky na Obr. 7-1 jsou dvě křivky. Zelená křivka představuje frekvenční charakteristiku bassreflexové ozvučnice a červená křivka ozvučnici typu bandpass. Jedná se tedy o porovnání ozvučnic neboli skříní se stejným vnitřním objemem, v případě bandpass je to součet objemů přední a zadní komory. Simulace je vytvořena dle parametrů zvoleného reproduktoru, pro bassreflexovou ozvučnici je nátrubek naladěný na 39 Hz. Pro bandpass jsou zvoleny parametry komor následovně, větší tedy zadní komora má objem 150 l s rezonančním kmitočtem 45 Hz a přední komora má objem 40 l a rezonanční kmitočet 101 Hz, z těchto hodnot vznikne výsledná charakteristika.

7.1.1 Bandpass

Jak je možné vidět z charakteristiky na Obr. 7-1, ozvučnice bandpass 6. řádu má v určitých kmitočtech téměř o 3 dB větší citlivost, což by znamenalo dvojnásobný výkon na tomto kmitočtu oproti bassreflexové ozvučnici. Jelikož se jedná o subwoofer, který bude užíván s největší pravděpodobností s dělicím kmitočtem 70-100 Hz, tak druhý vrchol na charakteristice nebude využit, jelikož leží na kmitočtu 120 Hz. Také je zřejmé, že na spodních kmitočtech má podstatně nižší citlivost, už na kmitočtu 40 Hz bude mít téměř o 5 dB nižší citlivost oproti bassreflexové ozvučnici, což by bylo znát. Kmitočtová charakteristika by musela být značně rozšířena a vyrovnána pomocí ekvalizéru. Pokud

by kmitočtová charakteristika byla posunuta o 10-15 Hz níže, měla by jistě velikou výhodu oproti bassreflexové, bohužel tomu tak není.

7.1.2 Bassreflex

Dle charakteristiky z Obr. 7-1 je zřejmé, že bassreflexová ozvučnice má sice nižší citlivost, má však rovnou charakteristiku, která začíná již od 36 Hz s poklesem 3 dB. Pochopitelně se jedná o ideální případ, kterého se nemusí dosáhnout.

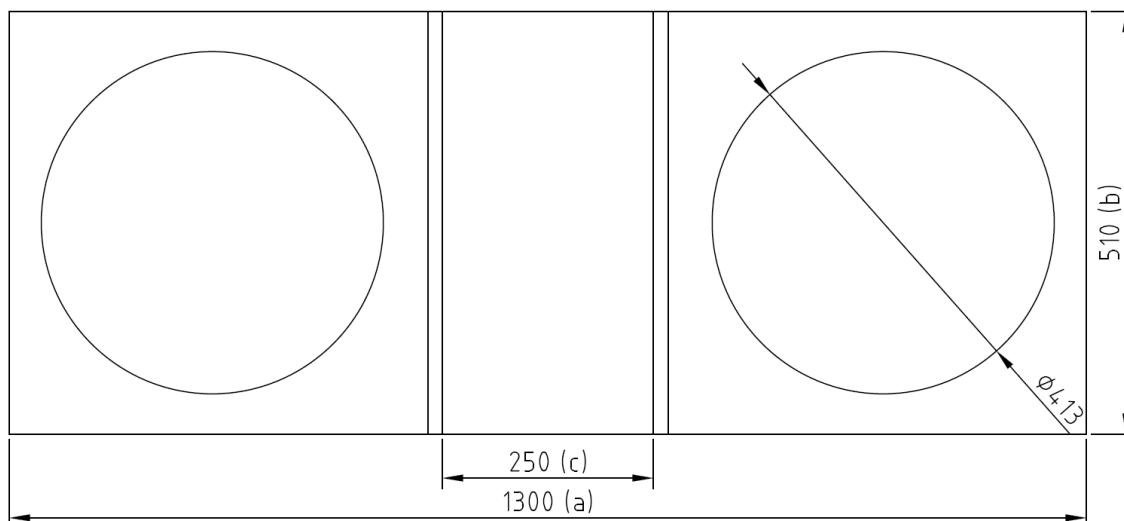
Její výhodou je daná rovnost charakteristik, oproti ozvučnici bandpass, tudíž nebude potřeba užívat složitější ekvalizaci. Počáteční kmitočet by mohl být položený níž, což bohužel v případě použitého reproduktoru nebude možné, proto i v tomto případě by bylo vhodné použít ekvalizaci, avšak pouze na získání nižších kmitočetů, toto však není podmínkou. Další výhodou je jednodušší konstrukce a také ladění nátrubku.

8. NÁVRH OZVUČNICE

Z předchozího rozboru volby ozvučnice se lépe jeví bassreflexová, kvůli kmitočtové charakteristice, rozsahu a také konstrukci.

8.1 Popis konstrukce

Bude se tedy konstruovat bassreflexová ozvučnice s výše uvedeným reproduktorem Beyma 18P1000Nd. Konstrukce bude obsahovat tyto 2 reproduktory, jejichž zapojení je popsáno v kapitole 3.1. Jedná se tedy o standartní konfiguraci dvou reproduktorů zapojených sériově nebo paralelně, v tomto případě se jedná o reproduktory s impedancí 8Ω , tudíž budou zapojeny paralelně a bude tak vytvořena reposoustava s impedancí 4Ω . Oba reproduktory budou umístěny na jedné straně ozvučnice, která bude mít pouze jeden nátrubek, což znamená, že reproduktory budou umístěny ve společném objemu.



Obr. 8-1- Nákres čelní desky subwooferu

Na Obr. 8-1 je předběžný náčrtek čelní desky subwooferu, pro určení plochy nátrubku. Z náčrtu je zřejmé, že se nebude využívat kruhových, respektive trubkových nátrubků, ale nátrubků s obdélníkovým průřezem. Tento nátrubek bude umístěn mezi reproduktory a bude tvořen stejným materiálem, jako je celá ozvučnice.

Čelní deska bude mít rozměry 1300x510 mm a nátrubek bude široký 250 mm z čehož vyplývá i jeho plocha, která činí $S_n = 0,1275 \text{ m}^2$, dle této plochy bude prováděn výpočet délky nátrubku. Uvedený náčrtek se bude pravděpodobně měnit dle výpočtů.

$$S_n = a \cdot b = 0,51 \cdot 0,25 = 0,1275 \text{ m}^2 \quad (8.1)$$

Objem ozvučnice bude v rozmezí 350-400 l, je to takové optimum pro reproduktory o průměru 18 palců čili okolo 200 l na jeden reproduktor, objem se může změnit, to vyplyne z následujících výpočtů.

8.2 Výpočet parametrů ozvučnice

Zde už přichází čas na výpočty parametrů ozvučnice, počínaje zmíněným objemem ozvučnice, který se bude počítat pomocí aproximace „Maximally flat“, což znamená pro rovnou kmitočtovou charakteristiku, respektive bez „hrbu“. O této aproximaci, nebo jinak metodě výpočtu, je psáno v kapitole 2.4.

Jako první bude výpočet objemu, kde se vychází z parametrů pro reproduktor uvedených v Tab. 6-1.

$$V_{b1} = 15,33 \cdot V_{as} \cdot Q_{ts}^{2,86} = 15,33 \cdot 157,7 \cdot 0,42^{2,86} = 202,24 \text{ dm}^3. \quad (8.2)$$

Jak je výše uvedeno, ozvučnice bude disponovat dvěma reproduktory, proto je třeba uzpůsobit i vstupní parametry pro výpočet. Uvedený výpočet objemu V_{b1} je objem potřebný pouze pro jeden reproduktor. Vstupní parametry se přepočítají následovně, některé parametry zůstanou původní, ale některé se zdvojnásobí nebo budou poloviční. Je tedy možné vybrat si 2 metody, jak ve výpočtu postupovat, buď ozvučnici počítat pouze pro jeden reproduktor z výchozích hodnot a výsledný návrh uzpůsobit pro dva reproduktory dle rozboru bassreflexové ozvučnice v kapitole 2.4. Nebo druhou metodou je výpočet dle upravených vstupních hodnot, kdy se výpočty provádí jakoby pro ozvučnici s jedním reproduktorem.

Je vhodné výpočet provádět druhou metodou, a to z upravených vstupních hodnot. Výchozí hodnoty se převezmou z Tab. 6-1 a upraví se pouze ty potřebné pro výpočet. Pro výpočet budou stačit v podstatě jen 3 parametry, a to rezonanční kmitočet reproduktoru f_s , celkový činitel jakosti Q_{ts} a ekvivalentní objem V_{as} .

Rezonanční kmitočet reproduktoru f_s bude stejný, neboť dva reproduktory se stejným rezonančním kmitočtem jej nijak nezmění. Problém by však nastal, pokud by se použily reproduktory s rozdílnými rezonančními kmitočty, to by pochopitelně způsobilo přidání nikoli jednoho, ale dvou rezonančních kmitočtů do celého systému a taková ozvučnice, respektive výsledná reprosoustava by nefungovala. Proto musí mít oba reproduktory rezonanční kmitočet v toleranci jednotek Hz. Spojením dvou reproduktorů v jednom systému:

$$f_{s2} = f_s. \quad (8.3)$$

Totožné to bude s celkovým činitelem jakosti reproduktoru, opět musí být dodržena tolerance, a to v jednotkách setin. V systému se dvěma reproduktory pak bude celkový činitel jakosti:

$$Q_{ts2} = Q_{ts}. \quad (8.4)$$

Změna nastane v ekvivalentním objemu reproduktoru, který se pochopitelně zdvojnásobí. Jelikož tímto objemem je myšlena poddajnost membrány reproduktoru, a pokud se jedná o standartní konfiguraci řešenou v kapitole 3.1, tedy umístění dvou reproduktorů do jedné ozvučnice, bude dvojnásobný:

$$V_{as2} = 2 \cdot V_{as} \cdot \quad (8.5)$$

Tolerance parametrů je sice důležitá, avšak v případě použití dvou stejných modelů reproduktorů, lépe tedy reproduktorů stejné výrobní šarže, se tolerance nijak řešit nemusí. A však v případě použití reproduktorů sice stejného modelu, ale jiného opotřebení, může již nastat problém. Nominální impedance reproduktorů musí být pochopitelně stejná, aby byl do každého dodáván stejný výkon.

Přepočtené parametry pro výpočet bassreflexové ozvučnice se dvěma reproduktory zapojené ve standardní konfiguraci.

f_s	41,28 Hz
V_{as}	315,4 l
Q_t	0,42

Tab. 8-1- Parametry pro výpočet- 2 reproduktory

Výpočet potřebného vnitřního objemu, tedy objemu prostoru pro oba reproduktory je proveden dle následujícího vztahu:

$$V_b = 15,33 \cdot V_{as} \cdot Q_{ts}^{2,86} = 15,33 \cdot 0,3154 \cdot 0,42^{2,86} = 0,404 \text{ m}^3. \quad (8.6)$$

Výpočetem je dán čistý vnitřní objem celé skříně, avšak bez nátrubku.

Pro tuto metodu je třeba vypočítat rezonanční kmitočet ozvučnice, respektive bassreflexových nátrubků. Tímto výpočtem se zjistí, jaký musí být rezonanční kmitočet, aby byla kmitočtová charakteristika rovná, jak je dáno metodou Maximally flat. Pak výpočet rezonančního kmitočtu je:

$$f_b = \frac{0,42 \cdot f_s}{Q_{ts}^{0,9}} = \frac{0,42 \cdot 41,28}{0,42^{0,9}} = 37,85 \text{ Hz}. \quad (8.7)$$

Dále se provede výpočet dolního mezního kmitočtu f_3

$$f_3 = \frac{0,26 \cdot f_s}{Q_{ts}^{1,4}} = \frac{0,26 \cdot 41,28}{0,42^{1,4}} = 36,15 \text{ Hz}, \quad (8.8)$$

což je kmitočet s poklesem 3 dB na kmitočtové charakteristice s dolní strmostí 24 dB/oct. Vypočtený rezonanční kmitočet je cca 38 Hz, tato hodnota je jedna z nejběžnějších, většina subwooferů jej má v rozmezí 30-40 Hz. Tento rezonanční kmitočet je pochopitelně závislý na rezonančním kmitočtu reproduktoru f_s .

Většina výrobců se snaží získat rovnou frekvenční charakteristiku s co možno nejnižším počínajícím kmitočtem. Avšak najdou se i tací, kterým o toto nejde a vlastně vytváří podivuhodný rezonátor, kdy je rezonanční kmitočet posazen příliš vysoko, potom výsledný subwoofer pouze „hučí“ a takto se pozná opravdu neprofesionální konstrukce, která také nestojí příliš moc. Na druhou stranu i tato „neprofesionální“ koncepce může mít také využití, ale za jiným účelem. Využití najde například v systémech, které jsou využívány pro určitý druh hudby, například reggae.

8.2.1 Výpočet rovného nátrubku

O typu nátrubku je psáno v kapitole 8.1, kde je zhruba popsána jeho konstrukce, z čehož vyplývá, že bude mít obdélníkový průřez s plochou $0,1275 \text{ m}^2$, pro který se bude počítat délka nátrubků. V teorii výpočtu bassreflexové ozvučnice v kapitole 2.4 je výpočet řešen podle rovnice (2.14, která ale využívá kruhového průřezu nátrubku, je tedy potřeba rovnici upravit pro výpočet s obdélníkovým průřezem, respektive přímo plochou nátrubku. Výsledná rovnice a výpočet délky nátrubku

$$l = \frac{9444 \cdot S}{\pi \cdot f_b^2 \cdot V_b} - 0,732 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} \quad (8.9)$$

$$l = \frac{9444 \cdot 0,1275}{\pi \cdot 37,85^2 \cdot 0,404} - 0,732 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 0,1275}{\pi}} = 0,377 \text{ m}. \quad (8.10)$$

Teď je hodnota délky nátrubku známá, a to $l=0,377 \text{ m}$, ale tato hodnota je pravdivá pouze ve výše vypočteném objemu $V_b=0,404 \text{ m}^3$. Objem je ale dán v rozmezí 350-400 l, dá se říct, že čím více, tím lépe, ale v rozumné míře. Zvolí se tedy objem 400 l, dobrou zprávou je, že není velký rozdíl mezi vypočteným objemem V_b , ale i přesto je třeba přepočítat dané hodnoty.

$$V_b' = 0,4 \text{ m}^3 \quad (8.11)$$

Dále je potřeba přepočítat délku nátrubku pro nový objem V_b' :

$$l' = \frac{9444 \cdot 0,1275}{\pi \cdot 37,85^2 \cdot 0,4} - 0,732 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 0,1275}{\pi}} = 0,374 \text{ m}. \quad (8.12)$$

Došlo ke změně objemu ozvučnice, vycházelo se z objemu $V_b = 0,404 \text{ m}^3$, ale ten se zmenšil na $V_b'' = 0,4 \text{ m}^3$. Ověření metody Maximally flat se provede dle následujícího výpočtu:

$$SPL_{paak} = 20 \log \cdot \left[2,6 \cdot Q_{ts} \cdot \left(\frac{V_{as} \cdot 10^{-3}}{V_b'} \right)^{0,35} \right] \quad (8.13)$$

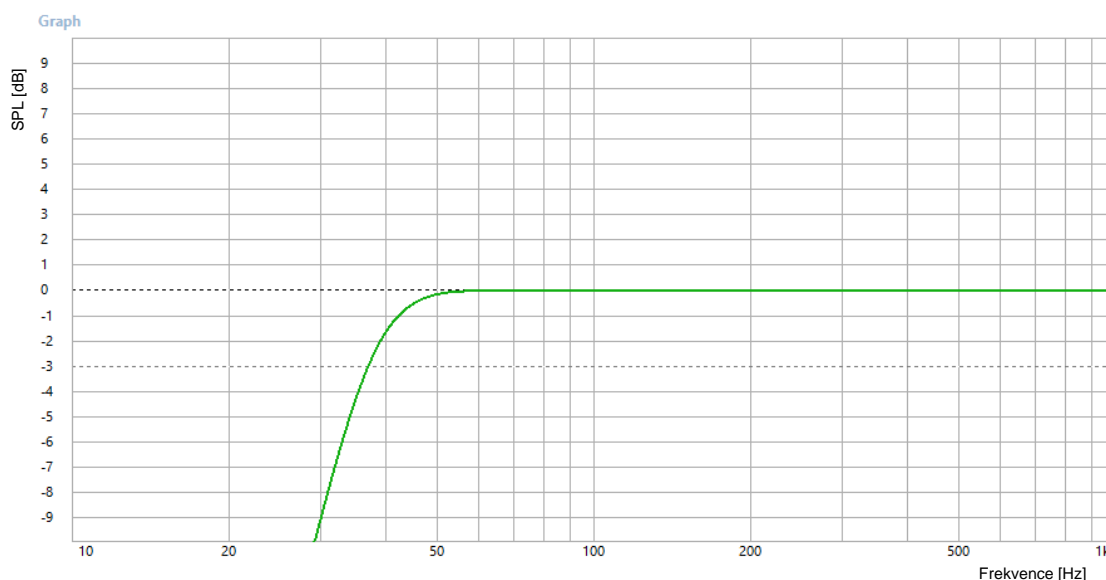
$$SPL_{paak} = 20 \log \cdot \left[2,6 \cdot 0,42 \cdot \left(\frac{0,3154}{0,4} \right)^{0,35} \right] = 0,04 \text{ dB}.$$

Výpočet ověřil, že nedojde k převýšení neboli „hrbu“ na frekvenční charakteristice, hodnota 0,04 dB je zanedbatelná.

8.2.2 Simulace ozvučnice

Provedené výše uvedené výpočty ozvučnice by měly odpovídat, ale je vhodné využít také simulačních programů, jako je například program WinISD popsán v kapitole 5.1. Program má tu možnost rozšíření knihovny o vlastní hodnoty reproduktorů, do které byl přidán reproduktor 18P1000Nd se změřenými hodnotami.

Pro vytvoření nové simulace se vybere daný reproduktor, dále se zvolí konfigurace reproduktoru a jejich počet, následně program vypočte činitel EBP, dle kterého se určí vhodnost použité ozvučnice a v posledním úkonu je třeba vybrat aproximaci, dle které bude proveden počáteční návrh. Program vlastně udělá kompletní návrh, respektive ten nejideálnější, který ale nemusí být pro uživatele zrovna ideálním, ale v tomto případě program navrhl reálné hodnoty, které se podobají konstrukci.



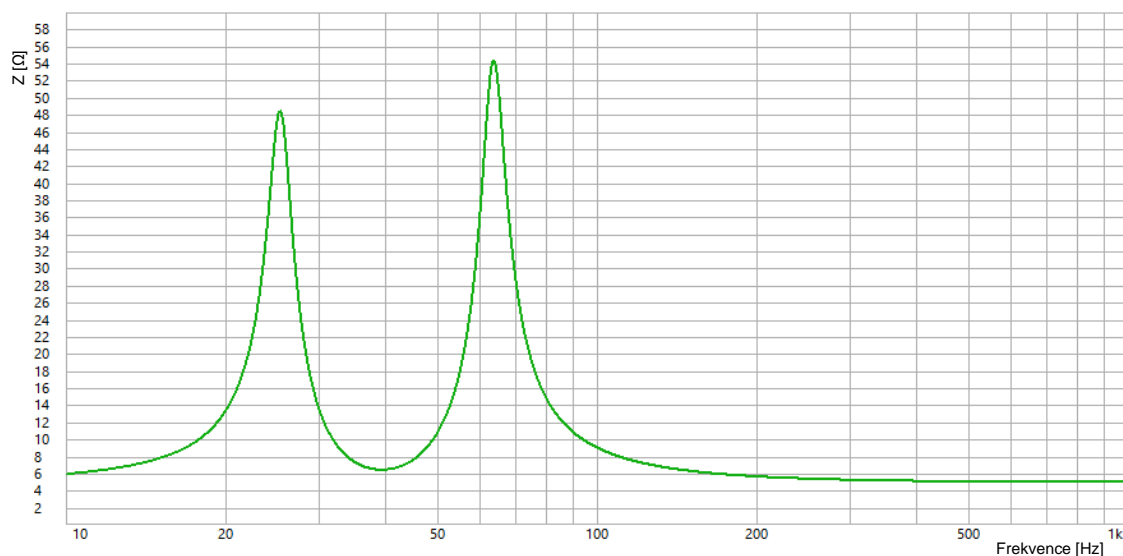
Obr. 8-2-Simulace kmitočtové charakteristiky

Hodnoty, které vypočítal program jsou uvedené v Tab. 2-1 a pro ně odpovídá i vyobrazená frekvenční charakteristika na Obr. 8-2. Hodnoty vyšly odlišně, v objemu skříně je rozdíl 36 l, rezonanční kmitočet je posazen téměř o 1 Hz výše a nátrubek je o 13 mm delší, avšak tyto rozdíly nejsou nijak zásadní. Z frekvenční charakteristiky je zřejmé, že je maximálně rovná a nedochází zde k žádnému převýšení. Ozvučnice by tedy mohla být i menší, pro docílení maximálně rovné charakteristiky. V teorii o bassreflexové ozvučnici je psáno, že křivka klesá se strmostí 24 dB/oct., na vyobrazené charakteristice je strmost přibližně 23 dB/oct..

V_b	0,368 m ³
f_b	39 Hz
l	0,387 m

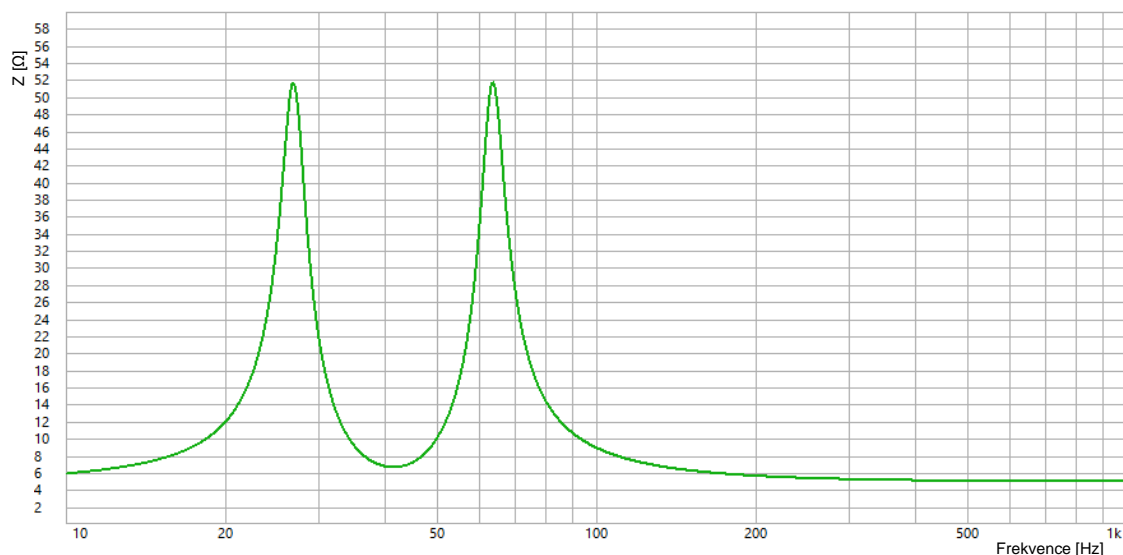
Tab. 8-2 Hodnoty vypočtené programem WinISD

Jednou z důležitých věcí, na které se zapomíná je impedanční charakteristika a ta koresponduje s rezonančním kmitočtem, o ni je také psáno v teoretické části. Zde, konkrétně u bassreflexové ozvučnice se nachází na impedanční charakteristice dva vrcholy, které by měly mít stejnou výšku čili maximální hodnotu impedance. K této kontrole je možné využít pouze nějaký ze simulačních programů či jiné softwaru.



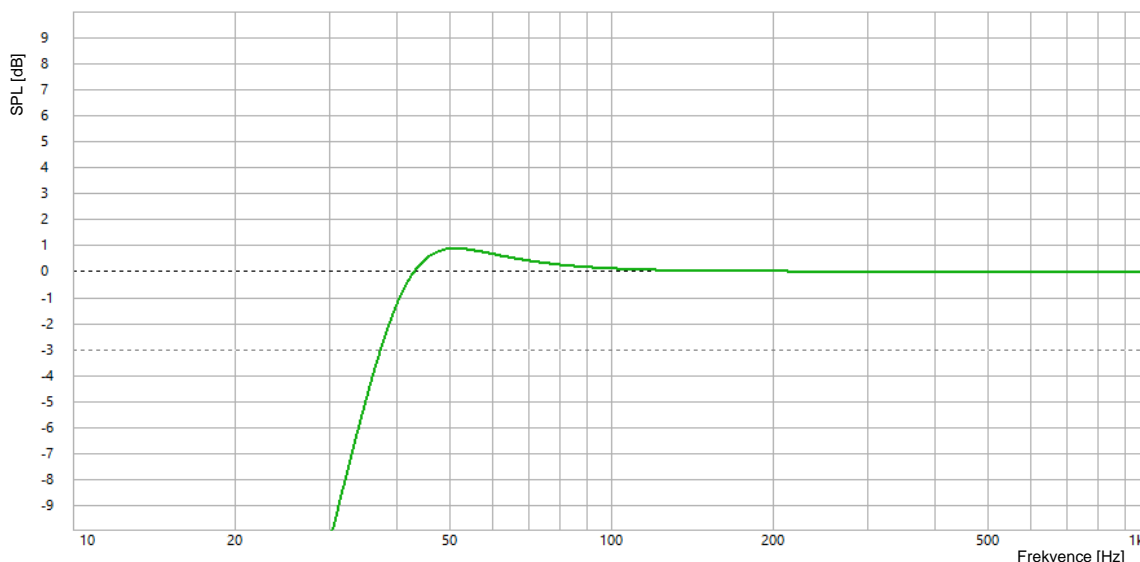
Obr. 8-3 Simulace impedanční charakteristiky

Další důležitou funkcí programu WinISD je simulace impedanční charakteristiky, ta je vyobrazena na Obr. 8-3 a je vidět, že vrcholy nemají stejnou hodnotu impedance, proto bude třeba změnit rezonanční kmitočet f_b tak, aby oba vrcholy měly stejnou hodnotu impedance.



Obr. 8-4 Výsledná impedanční charakteristika

Do simulačního programu se zadá aktuální objem ozvučnice, který činní $V_b = 0,4 \text{ m}^3$. Aby měly oba vrcholy stejnou hodnotu impedance, musí se rezonanční kmitočet zvýšit na 41 Hz, pak je odpovídající impedance charakteristika vyobrazena na Obr. 8-4, vrcholy mají již stejnou hodnotu. Jelikož se změnil rezonanční kmitočet f_b , bude také pozměněna kmitočtová charakteristika, jak zásadně se to projeví je vyobrazeno na Obr. 8-5.



Obr. 8-5 Výsledná kmitočtová charakteristika simulace

Změna rezonančního kmitočtu bude mít za následek vznik „hrbu“, tedy převýšení na kmitočtové charakteristice o 1 dB a zkrácení bassreflexového nátrubku na $l = 0,264 \text{ m}$. Jedná se pouze o 1 dB, ale v tomto umístění, přibližně na kmitočtu 50 Hz by se tato změna mohla brát jako pozitivum.

Shrnutí výpočtů a simulací je:

$$V_b = 0,4 \text{ m}^3$$

$$f_b = 41 \text{ Hz}$$

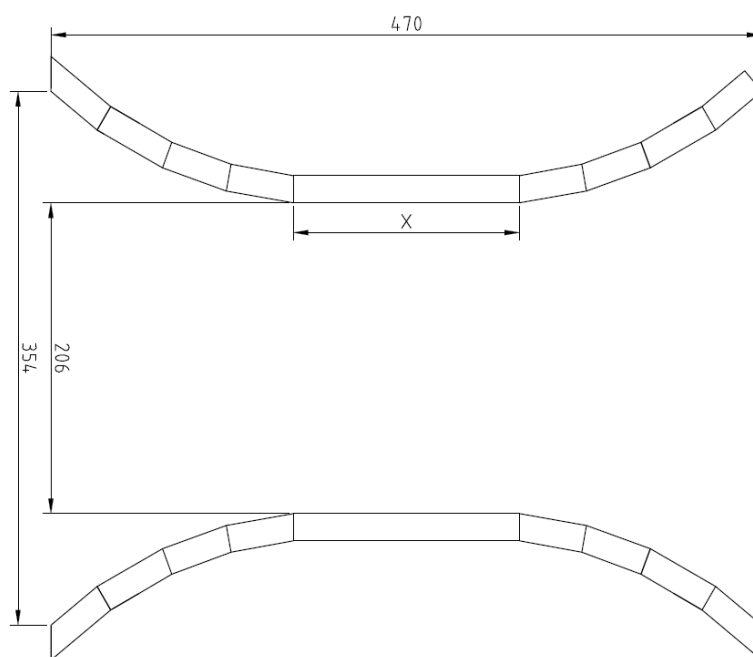
$$l = 0,264 \text{ m}.$$

Tyto hodnoty by měly odpovídat pro konstrukci ozvučnice s nátrubkem, který je tvořen rovnými deskami čili má konstantní obdélníkový průřez, případně by byly jeho hrany opatřeny zaoblením. Pravděpodobně by bylo vhodné zvětšit plochu nátrubku, jelikož jeho délka je větší pouze o 14 mm, bude se tak zdát málo hluboký, ale podle tohoto návrhu se nebude provádět konstrukce.

8.2.3 Zahnutý nátrubek

Nátrubek s rovnými deskami je běžná věc, ale vytvořit nějaký zvukovod neboli nátrubek s velkým rádiusem je mnohem složitější. S takovýmto problémem si neporadí téměř žádný z běžně dostupných simulačních programů, ale bude jej třeba řešit pomocí metody konečných prvků.

Výhodou zaobleného nátrubku oproti rovnému je hlavně zánik turbulentních jevů, ale také estetická vlastnost. Zařízení opatřené takovouto konstrukcí se hned jeví „profesionálnější“. Předběžný návrh průřezu délky bassreflexového nátrubku je na Obr. 8-6.



Obr. 8-6 Zahnutý bassreflexový nátrubek

Návrh ozvučnice bude vycházet ze simulace řešené v kapitole 8.2.2, změna bude pouze v nátrubku. Cílem bude nátrubek naladit tak, aby impedanční charakteristika odpovídala charakteristice uvedené na Obr. 8-5. Tato metoda nebude založena na přesném výpočtu délky nátrubku, ale spíše na praktickém ladění, ale i pro tuto metodu je třeba předem navrhnout přibližnou délku nátrubku, respektive délku o něco větší, aby mohla být dle měření zkracována. Pro přibližnou délku je třeba vypočítat střední průřez nátrubku, který se vypočte součinem ze střední šířky nátrubku a jeho výšky.

Šířka nátrubku, respektive šířka pouze zahnuté části, bez délky X, viz Obr. 8-6, byla stanovena přibližně $c_n = 0,35$ m, a to ze střední šířky nátrubku, která činí $c_{sn} = 0,26$ m s koeficientem k pro zahnuté nátrubky, který je stanoven za předpokladu velkého rádiusu zaoblení nátrubku.

$$c_n = \frac{c_{sn}}{k} = \frac{0,26}{0,732} = 0,352 \text{ m} . \quad (8.14)$$

$$S_n = c_n \cdot b = 0,352 \cdot 0,51 = 0,18 \text{ m}^2 . \quad (8.15)$$

Z výpočtu (8.14) je vidět, že šířka nátrubku je téměř stejná, jako nejširší část nátrubku, je to dáno jeho velkým rádiusem, kterým je zakončen. Pro dopočet délky mezičlenu X se bude uvažovat šířka nátrubku c_n , a to bude velmi orientační výpočet. Při výpočtu délky zahnutého nátrubku byl použit rezonanční kmitočet $f_b = 41 \text{ Hz}$, pro vyrovnanou impedanční charakteristiku. Pak délka nátrubku vyšla:

$$l = \frac{9444 \cdot S}{\pi \cdot f_b^2 \cdot V_b} - 0,732 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}$$

$$l = \frac{9444 \cdot 0,18}{\pi \cdot 41^2 \cdot 0,404} - 0,732 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 0,18}{\pi}} = 0,454 \text{ m} . \quad (8.16)$$

Přece jenom se jedná o orientační výpočet a ve skutečnosti by mohla být potřebná délka větší, proto se vypočtená délka zvětší o 15 %, pak je konečná délka X spojující části nátrubku před laděním:

$$l' = (l \cdot 1,15) - 0,32 = (0,454 \cdot 1,15) - 0,32 = 0,202 \text{ m} . \quad (8.17)$$

Nátrubek bude také konstruován z desek čili materiálu, ze kterého je vyrobena ozvučnice, ale bude vytvořen rozvíjející se tvar směrem ven z ozvučnice a také do ozvučnice. Nejprve budou vytvořeny zahnuté části, které se s laděním měnit nebudou, samotné ladění nátrubku bude totiž prováděno jeho délkou, to znamená pouze změnou délky desky, spojující zahnuté části, o délce X vyznačené v nákresu na Obr. 8-6. Přesnější popis ladění bude řešen v konstrukci ozvučnice. Konstrukce zahnuté části nátrubku, respektive jeho částí po slepení jsou na fotografii v příloze 2A.

9. KONSTRUKCE OZVUČNICE

V této kapitole bude řešena konstrukce ozvučnice jako takové, a to celkový konstrukční návrh, výběr materiálu, dále také výztuhy, tlumení a na konec povrchová úprava.

Z výpočtů v minulé kapitole bylo zjištěno, že ozvučnice bude mít čistý vnitřní objem 400 l, předem byla také definovaná čelní deska o daných rozměrech, proto zbývá zvolit pouze jeden další rozměr pro definování objemu, a to hloubku ozvučnice. Ozvučnice bude mít čelní desku zapuštěnou 40 mm, a tak bude celá ohraničená bočnicemi a reproduktor bude moci být schován pod ochrannou mříží. Nátrubek je zvolen zahnutý, ten však žádné chránění mít nebude, ale jeho hrana u reproduktoru bude tvořit čtvrtou stranu čili bude vysunut o 40 mm před čelní desku.

9.1 Výběr konstrukčního materiálu

O konstrukčních materiálech je pojednáváno v kapitole 4.1, přičemž konstrukce subwooferu pro PA odvětví nepochybně spadá do jisté kategorie. Proto konstrukce z vybraného materiálu musí být velmi mechanicky odolná, odolná vlhku a pokud to jde, tak co možno nejlehčí. Toto jsou často protichůdné požadavky, ale je potřeba najít nějaký kompromis.

Dle rozboru v kapitole 4.1 je vybíráno z překližek, všechny překližky jsou velmi pevné, díky střídání několika vrstev v opačném směru růstu dřeva. Překližky jsou díky tomuto i velmi pružné a velmi odolné nárazům, ale zato mohou rezonovat, což je nežádoucí jev. Vybírat lze z veliké škály druhů překližek, dle typu dřeva a jakosti.

Překližky mohou být dubové, březové, borovicové nebo jiné. Z jehličnanů budou jistě lehčí než z listnatých stromů, respektive lehčí než dub či bříza, avšak dá se očekávat menší kvalita, jelikož tyto překližky obsahují mezi vrstvami dutiny. Dubová překližka bude velmi pevná, odolná a tuhá, ale zato také velmi těžká, což se projeví na hmotnosti celé ozvučnice. Ideálním kompromisem je překližka březová, jejíž pevnost je také dosti velká, a není příliš těžká. Dobré je se pozastavit i nad jakostí, která má základní značení od nejvyšších po nejnižší B, BB, CP a C. Tyto třídy označují například maximální počty suků, možnost vysprávek, tmelení a podobně. S nižší jakostí se také snižuje cena, takže je vhodné zvážit, dle povrchové úpravy, jestli je nutná vyšší jakost.

Tato konstrukce subwooferu bude vyrobena z březové překližky o tloušťce 18 mm jakosti BB, u které jsou dovoleny suky o průměru 3 mm, zdravé světlé a tmavé suky, dále jsou dovoleny také záplaty. Cena plotny o rozměrech 1250x2500 mm se pohybuje okolo 1500 Kč za kus, tedy celkem přijatelná cena. Pro konstrukci jednoho subwooferu budou potřeba dvě plotny. [8]

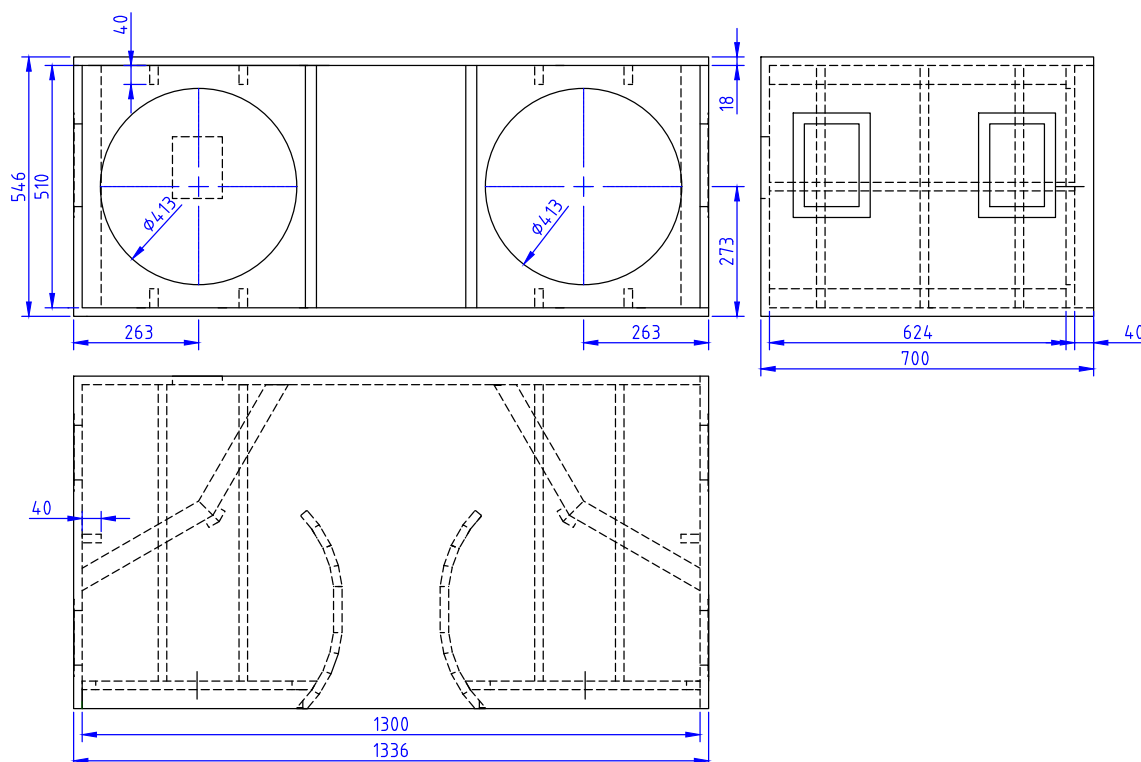
9.2 Výztuhy

Výztuhy u takto objemné skříně jsou důležité, jen tak je možné při použití ne příliš tlustého konstrukčního materiálu zvýšit jak pevnost skříně, tak i tuhost a snížit vlastní rezonanci.

Výztuhy jsou v této konstrukci tvořeny „žebrováním“, kde na dně a víku skříně jsou vytvořeny žebra, které zpevňují dané plochy a také spojují čelní desku se zadní, takže vibrace způsobené reproduktorem jsou přeneseny do celé části konstrukce. Další výztuhou je ta, která spojuje dno s víkem a zároveň ve středu této výztuhy je vytvořena další, která spojuje bočnici se zadní stranou. I na bočnicích se nachází jedna výztuha v podobě žebra. Sám nátrubek tvoří výztuhu. Žebrové výztuhy společně s prostorovou výztuhou jsou vidět na fotografii v příloze 2B.

9.3 Návrh v AutoCADu

Návrh ozvučnice byl nakreslen v programu AutoCAD a to pouze ve 2D, nárys bokorys a půdorys, popřípadě dílčí nákresy. Náčrten obsahuje výztuhy, kterých je v konstrukci celkem dost, protože skříň je dosti objemná, dále také otvory pro madla, terminál a pochopitelně čelní desku s reproduktory a nátrubkem.



Obr. 9-1 Náčrten konstrukce subwooferu

Z náčrtu na Obr. 2-1 je vidět umístění bassreflexového nátrubku, jehož konstrukce je popsána v kapitole 8.2.3, jeho hloubka je díky rozšiřujícímu se tvaru větší, tudíž i jeho

poměr objemu k celé ozvučnici je větší. Vnitřní hloubka skříně je 624 mm pro splnění potřebného objemu. Se zapuštěním čelní desky o 40 mm, a je pak celková hloubka skříně 700 mm. Vnitřní objem skříně jako takový je dle rozměrů nákresu 413,7 l, tento objem se však ještě změní, jelikož jsou v konstrukci zahrnuty i výztuhy a další konstrukční prvky uvnitř skříně, včetně desek tvořící nátrubek a objemu reproduktorů. Od objemu 413,7 l je odečten objem výztuh a konstrukce bassreflexového nátrubku, který činí cca 10 l. Objem magnetu a koše reproduktoru je malý, díky použitých reproduktorů s neodymovými magnety, přibližně 3,7 l. Pak je objem blízký se 400 l potřebný pro výpočet nátrubku.

9.4 Komponenty

Ozvučnice bude doplněna několika komponenty, které budou zajišťovat snadnější manipulaci, připojení ke zdroji signálu a ochranu před mechanickým poškozením.

Při konstrukci je potřeba řešit i uchopení subwooferu pro přemísťování, zde už nebude dostačující pouze jedno madlo na každé straně, ale alespoň dvě. Při použití celkem čtyř madel se nemusí kriticky řešit těžiště, ale i tak se těžiště nachází blíže k reproduktorům. Jsou použity madla o rozměrech 220x162 mm, fotografie je na Obr. 9-2. Madla budou ve stěnách zapuštěna o tloušťku plechu, ze kterého jsou vyrobená. Jak je provedeno jejich umístění a zapuštění je na fotografii v příloze 4C.



Obr. 9-2 Madlo Adam Hall [9]

Dále je potřeba použít vhodný připojovací terminál s konektory, zde se bude jednoznačně jednat o konektory Speakon, které jsou schopny přenášet velké proudy až 30 A. Konektor Speakon má 4 piny, pokud k připojení stačí dva, mohou se tak vždy dva spojit paralelně, přičemž se získá větší proudová zatížitelnost. U subwooferů se většinou používají dva konektory, to proto, aby bylo možno spojit více subwooferů paralelně. Avšak u této konstrukce se jedná o subwoofer s impedancí 4 Ω , a při paralelním spojení dvou takovýchto subwooferů by se vytvořila impedance 2 Ω . Zde by už mohl být problém

s výběrem vhodného zesilovače, který by musel být konstruován na velký výkon, až 8 kW špičkově. Proto se s největší pravděpodobností bude používat samostatný zesilovač pro jeden subwoofer, a proto by byl dostačující terminál pouze s jedním konektorem. Nicméně, na základě dalšího rozvoje této problematiky byl vybrán připojovací terminál se dvěma konektory Speakon, který je zapuštěný a konektory jsou umístěny pod určitým úhlem. Terminál je na Obr. 9-3.



Obr. 9-3 Připojovací terminál Adam Hall-2x Speakon [9]

Na terminálu je výlisek, respektive prohlubeň, do které by bylo vhodné umístit nějaký text, do daného místa tedy bude laserem vygravírovaný text s parametry subwooferu. I terminál bude zapuštěný o tloušťku plechu. Detailní fotografie zapuštění, respektive vyfrézovaného okna je v příloze 2C, kde je také vidět gravírovaný text na terminálu.

Na spodní straně subwooferu neboli dně bude umístěno 6 gumových nožek o průměru 38 mm a výšce 15 mm.

9.4.1 Ochranné mříže

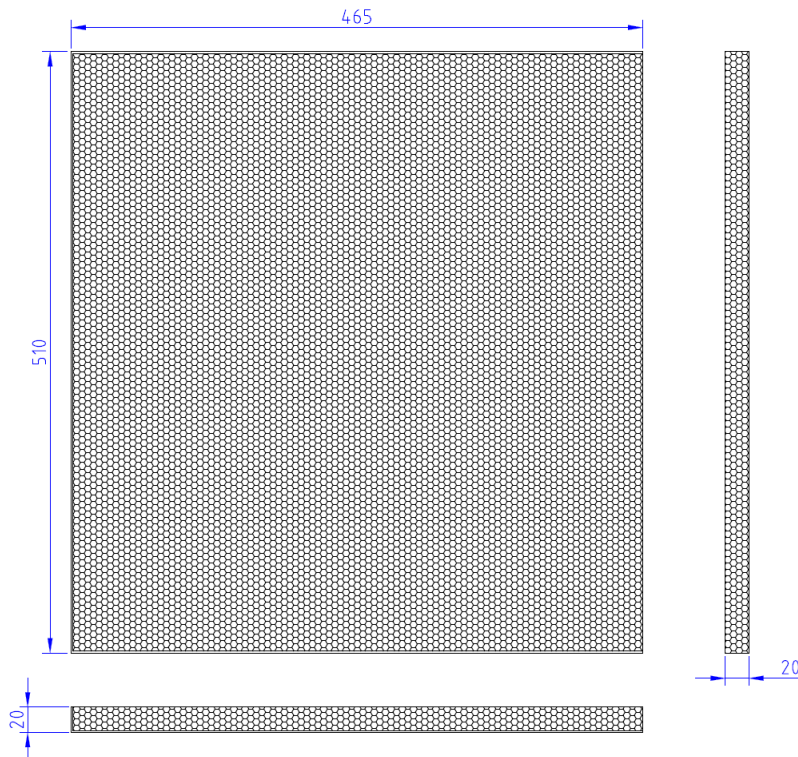
Velkou otázkou je ochrana přední strany membrány reproduktoru před poškozením. Jednoduše a levně by se to dalo vyřešit zakoupením prodáváných ochranných mříží kulatého tvaru přímo na reproduktor, ale dle podobných komponentů se pozná laciná konstrukce. Aby se řešená konstrukce takovýmto výrobkům nepodobala, je třeba vymyslet něco originálnějšího, a to například využití děrovaného plechu jako takového. Reprodukter je společně s čelní deskou zapuštěn o 40 mm oproti okolním hranám, a tento vzniklý prostor bude možné využít pro účel ochrany reproduktorů. Je vhodné se seznámit s dostupným sortimentem vhodných děrovaných plechů, které jsou nejčastěji prodávány v plotnách o rozměrech 1000x2000 mm nebo vybrat jiný dostupný rozměr tak, aby při výrobě ochranných krycích „mříží“ nevznikal velký odpad. Zmíněný rozměr by měl tomuto kritériu vyhovovat. Při výběru děrovaného plechu je potřeba vybrat vhodné

děrování, například čtvercové řadové a přesazené nebo kruhové řadové a přesazené. Krycí plocha před reproduktorem nebude o moc větší než právě plocha membrány reproduktoru, proto je důležité zvolit co možno největší světlost, respektive velké procentuální zastoupení volné plochy, aby nekladl odpor proudícímu vzduchu. Pak je vhodné vybírat z děrovaných plechů s kruhovým přesazeným děrováním, následně zbývá výběr průměru, rozteče otvorů a tloušťky plechu. Tomu nejlépe odpovídá plech se značením RV 4;5, první číslice značí průměr děr a druhá číslice vzájemnou rozteč děr. Vybraný děrovaný plech je možno vidět na Obr. 9-4 v měřítku 1:1.



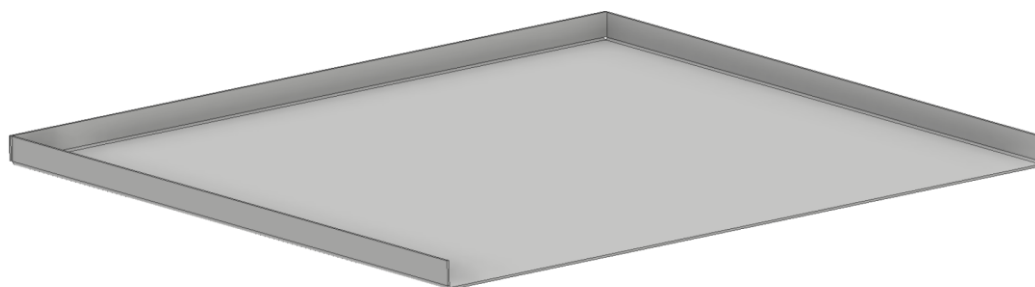
Obr. 9-4 Děrovaný plech RV 4;5 1:1 [10]

Aby bylo možné děrovaný plech zapustit do profilu čelní desky a také aby se příliš neprohýbal, bude potřeba na hranách vytvořit lemy, respektive ohyby, které budou vysoké přibližně 20 mm. Lemy budou vytvořeny pouze tři, protože čtvrtá hrana děrovaného plechu bude zapuštěna ve hraně desky bassreflexového nátrubku. Plotna děrovaného plechu má po delších stranách na hranách neděrovaný pruh, právě tato hrana bude bez lemu pro zapuštění do hrany u nátrubku. Děrovaný plech bude uchycen pomocí šroubů s metrickým závitem přes distanční mezikusy až na čelní desku, kde budou narážecí matice. Náskres tohoto dílu je na Obr. 9-5.



Obr. 9-5 Náskres ochranného děrovaného plechu

Pro lepší představení tohoto dílu byl vytvořen vícerozměrný nákres, který je na Obr. 9-6.



Obr. 9-6 Nákres ochranného děrovaného plechu – 3D

Ochrana reproduktoru před mechanickým poškozením je vyřešena, ale jak je možno vidět z nákresu konstrukce subwooferu na Obr. 9-1 bassreflexový nátrubek bude úplně odkryt. Jeho šířka je podstatně velká a to 206 mm, což znamená, že nátrubkem se mohou do vnitřního prostoru ozvučnice dostat cizí tělesa nebo zvířata při použití ve venkovním prostředí. Bude potřeba vyřešit, jak tomu zabránit. Nejjednodušším způsobem by bylo překrytí celé plochy čelní desky včetně nátrubku, ale to by potom nebyl vidět jeho tvar. Tudíž „zábrana“ se může umístit na konec nátrubku ve vnitřním prostoru ozvučnice. Nikoli přímo na nátrubek, ale mezi stěnu nátrubku a zadní stranu ozvučnice, pak jsou potřeba dva kusy. Tato zábrana bude vyrobena ze stejného děrovaného plechu jako ochrana reproduktorů. Plech je také třeba upravit zahnutím dvou stran pod určitým úhlem, aby zahnuté plochy doléhaly ke stěnám v ozvučnici, kde budou připevněny. Nákres dílu s potřebnými rozměry a úhly pro zhotovení se nachází na Obr. 9-7.



Obr. 9-7 Vnitřní zábrana-nákres

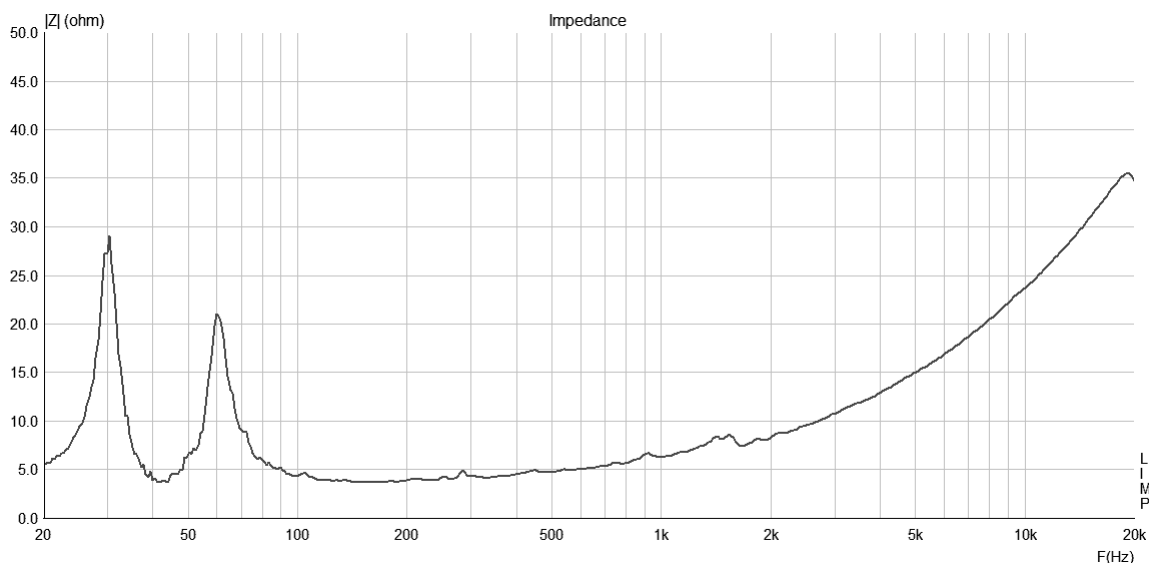
Všechny díly vyrobené z děrovaného plechu budou opatřeny povrchovou úpravou nástríkem černé syntetické barvy.

9.5 Ladění nátrubku

Jelikož bude konstrukce subwooferu obsahovat zahnutý nátrubek řešený v kapitole 8.2.3, bude třeba délku nátrubku měnit na základě měření impedanční charakteristiky. To znamená, že ozvučnici je nutné „postavit“, a to bez lepení, aby bylo možné ozvučnic opět rozebrat a změnit délku nátrubku. Ozvučnice bude nejprve „sešroubována“ pomocí

vrutů a osazena terminálem, madly a reproduktory. Impedanční charakteristika bude měřena pomocí programu Limp, který je řešený v kapitole 5.2.1.

Problém nastal, když byla impedanční charakteristika v prostoru dílny, jehož akustika zkreslovala výsledky měření, respektive naprosto měnila charakter ozvučnice dle charakteristiky. Zkreslení bylo natolik velké, že oba vrcholy charakteristiky byly na stejné hodnotě ve chvíli, kdy byl z ozvučnice nátrubek vyjmut. Měření se muselo provést na volném prostranství, a to venku, pak byly výsledky měření použitelné k nějakému stanovisku.



Obr. 9-8 Impedanční charakteristika pro nátrubek s délkou $X=0,202\text{ m}$

Ze změřené impedanční charakteristiky na Obr. 9-8, je vidět, že impedanční maxima nemají stejnou hodnotu. První maximum má přibližně o $7,5\ \Omega$ větší impedanci, z čehož vyplývá nutné zkrácení bassreflexového nátrubku, respektive délky mezikusu o délce X . Ladění bude probíhat postupným zkracováním délky mezikusu o určitou hodnotu. Z počátku 2 měření byla provedena se zkrácením o 60 mm, po 30 mm, v tuto chvíli se už impedanční maxima začaly vyrovnávat a od této chvíle bylo třeba délku měnit s menším krokem. Pokračovalo se v krocích po 10 mm až do vyrovnání impedančních maxim. Impedanční maxima měly stejnou maximální hodnotu ve chvíli, kdy byl mezikus zkrácen na délku $X=100\text{ mm}$. V tuto chvíli se mohlo pokračovat v konstrukci, respektive k rozebrání sešroubované ozvučnice a její následné slepení a dalšímu postupu.

Pravdou je, že ladění nebude pravděpodobně zcela přesné, jelikož bylo prováděno na neslepené ozvučnici, kdy spoje nebyly dokonale těsné a také nebyly použity ochranné děrované plechy a tlumení. Po dokončení výroby subwooferu bude opět změřena impedanční charakteristika, na které se tento problém jistě projeví.

9.6 Spojování stěn

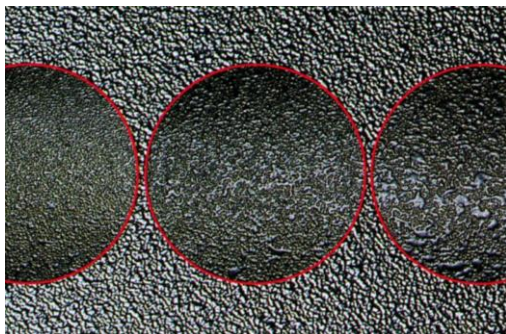
Ohledně spojování stěn je psáno v teorii reproduktorových ozvučnic v kapitole 4.2. V této konstrukci budou jednotlivé překližkové desky spojovány tzv. „natupo“, protože vytváření nějakého zámku by bylo složité. I spojení natupo může vytvořit velmi pevný spoj, je však potřeba použít vhodné lepidlo a kolíky. V mé praxi se pro lepení reproduktorových ozvučnic nejlépe osvědčilo polyuretanové lepidlo. Díky tomu, že lepidlo lehce expanduje, tak dokáže vyplnit všechny nerovnosti řezu hrany desek a spoj je nepochybně pevný. Kolíkování už nemusí být nutné, zejména u Hifi, ale v PA odvětví je vhodné.

Při lepení nebudou použity dřevěné kolíky, ale šrouby, respektive samořezné vruty. Pro šrouby je dobré předvrtat díry, a to jen v desce, kterou prochází. Postup lepení je následovný. Polyuretanové lepidlo se nanese na hranu, která se bude lepit, přiloží se lepené části a stáhne se svěrkami tak, aby nevznikaly žádné přesahy, následně se lepená místa stáhnou šrouby tak, aby byly zapuštěny. Lepidlo schne celkem rychle, cca za 1 hodinu je tuhé a za 24 hodin dostatečně pevné. Postup lepení bude proveden až po doladění nátrubku.

9.7 Povrchová úprava

Velkým otazníkem v konstrukci reproduktorových skříní je jejich konečná povrchová úprava. Konkrétně u subwooferů není moc variant, použití samolepící tapety, dýhování, potažení kobercem nebo vhodné barvy. První dvě varianty jsou pro PA nevhodné a co se týče koberce, respektive potahové látky vhodná je, ale působí lacině. Pak je tu profesionálnější varianta, která spočívá v nánosu speciální barvy, vlastně nátěrové „hmoty“. Úplně nejlepší je tento nános provést nástřikem pneumatickou stříkácí pistolí.

Řešený subwoofer bude opatřen povrchovou úpravou nástřikem strukturovaného laku Warnex odstínem RAL 9005, čili černou barvou. Strukturovaný lak Warnex má tu výhodu, že sám uživatel si může zvolit, jakou strukturu chce provést, a to změnou nastavení pneumatické pistole. Nevýhodou z uživatelského hlediska je fakt, že barva má velkou viskozitu, aby vytvořila danou strukturu. Proto není možné použít klasické pneumatické stříkácí pistole, ale pneumatické stříkácí pistole s tlakováním nádoby na barvu, ta je ovšem velmi drahá. Struktura, kterou lze vytvořit je na Obr. 9-9.



Obr. 9-9 Struktura Warnex [11]

Před nástřikem je třeba slepenou ozvučnici opracovat. Nejprve jsou vytmeleny zapuštěné šrouby, a to na několikrát, dále se jedná o srovnání lepených spojů a případné tmelení a zaoblení všech vnějších hran frézou o poloměru 8 mm. Nakonec už jen vybrousit a napenetrovat například dispersní penetrací.

Po vysušení se může nanášet strukturovaný lak. Nanášení je prováděno v několika vrstvách, první je krycí, která má jemnou strukturu, další vrstvy se provádí snížením tlaku, a tak se docílí hrubší struktury.

9.8 Kompletace

Dle výše uvedených kapitol bylo provedena konstrukce ozvučnice jako takové. To znamená její lepení a povrchová úprava. Takto dokončená ozvučnice je připravena pro osazení komponenty a reproduktory. Veškeré rozebíratelné spoje jsou řešeny pomocí šroubů s metrickým závitem, to znamená, že každé madlo, připojovací terminál, nožky a reproduktory jsou připevněny pomocí narážecích matek z vnitřní strany ozvučnice a šrouby. Je kladen důraz na to, byly všechny šrouby opatřeny imbusovou hlavou nebo torx. Všechny použité šrouby jsou zinkované a opatřeny černým nástřikem, aby splývaly s povrchem. V případě použití šroubů s křížovou hlavou, by se mohla barva porušit možným „přeskakováním“, v případě imbusu je tomu zabráněno. Všechna madla a připojovací terminál jsou opatřeny vhodným těsněním, aby bylo zabráněno jak rezonování, tak průniku vzduchu, to platí i u reproduktorů a děrovaného plechu uvnitř ozvučnice. Do prostoru ozvučnice bylo také vloženo tlumící rouno o výšce 30 mm, které bylo přilepeno na stěny, pro snížení stojatých vln, provedení je na fotografii v příloze 3A. Reproduktory byly připojeny k terminálu kabelem 2x 2,2 mm² paralelně.

Na připojovací terminál byl vygravírován laserem text udávající výkon a impedanci subwooferu a také logo výrobce, detail terminálu je na fotografii 2C. Bylo by zajímavé, kdyby se logo vygravírovalo i na děrovaný plech chránící reproduktor, avšak tím, že je plech děrovaný by nemusel vyniknout, ale naopak uškodit estetické stránce. Pokud se logo udělá dostatečně velké, mělo by být čitelné. Logo se skládá z iniciálu jména autora této práce, „ONTY AUDIO“. Jak gravírování ve výsledku vypadá, je možno vidět na fotografiích v příloze 2C a 4A, B.

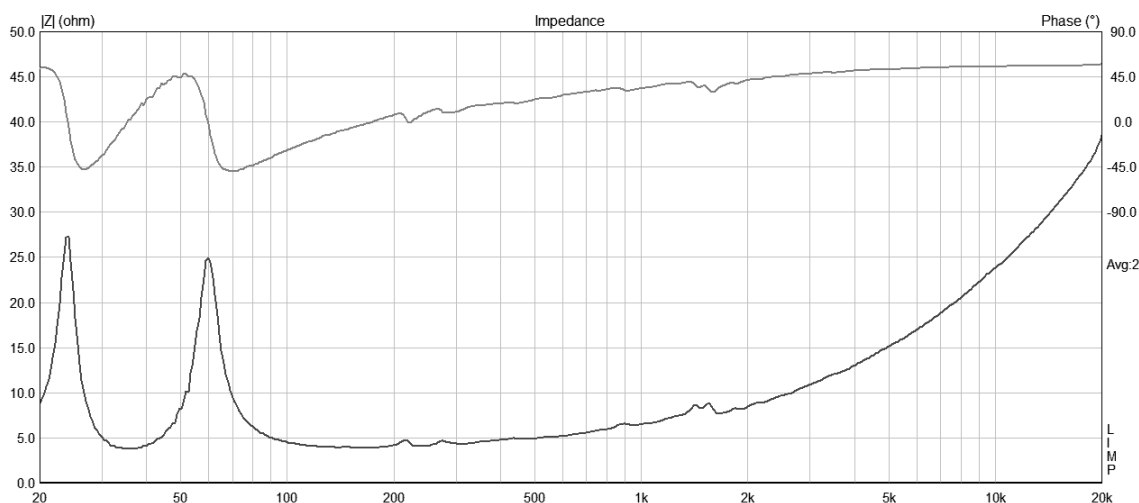
Subwoofer je na konec osazen i předním ochranným děrovaným plechem a je tak připraven k měření. Hotový subwoofer je na fotografiích v příloze 4A-C.

10. MĚŘENÍ SUBWOOFERU

Hotový subwoofer bude podroben měření pro zhodnocení konstrukce. U subwooferu bude změřena impedanční charakteristika, která ukáže rozdíl, který nastal po slepení a finální úpravy včetně kompletace. Vzápětí bude u subwooferu měřena také kmitočtová charakteristika, která ukáže, jestli simulovaný průběh kmitočtové charakteristiky bude odpovídat změřenému průběhu. Měření frekvenční charakteristiky bude dosti problematické, respektive nepřesné, jelikož nebude měřena v bez odrazové místnosti, ale na volném prostranství. Obě charakteristiky nebudou měřeny nikde na betonové ploše, ale na trávnickové ploše, která zajistí alespoň částečné tlumení.

10.1 Měření impedanční charakteristiky

Pro měření impedanční charakteristiky subwooferu bude použit program Limp řešení v kapitole 5.2.1, který je popsán pro měření parametrů reproduktorů neboli jejich impedanční charakteristiky. To však znamená možnost jej použít i pro měření impedanční charakteristiky hotového subwooferu. Subwoofer tedy bude připojen pomocí měřícího přípravku v počítači, respektive ke zvukové kartě a bude provedeno měření, které bude trvat jen pár sekund.



Obr. 10-1 Změřená impedanční charakteristika

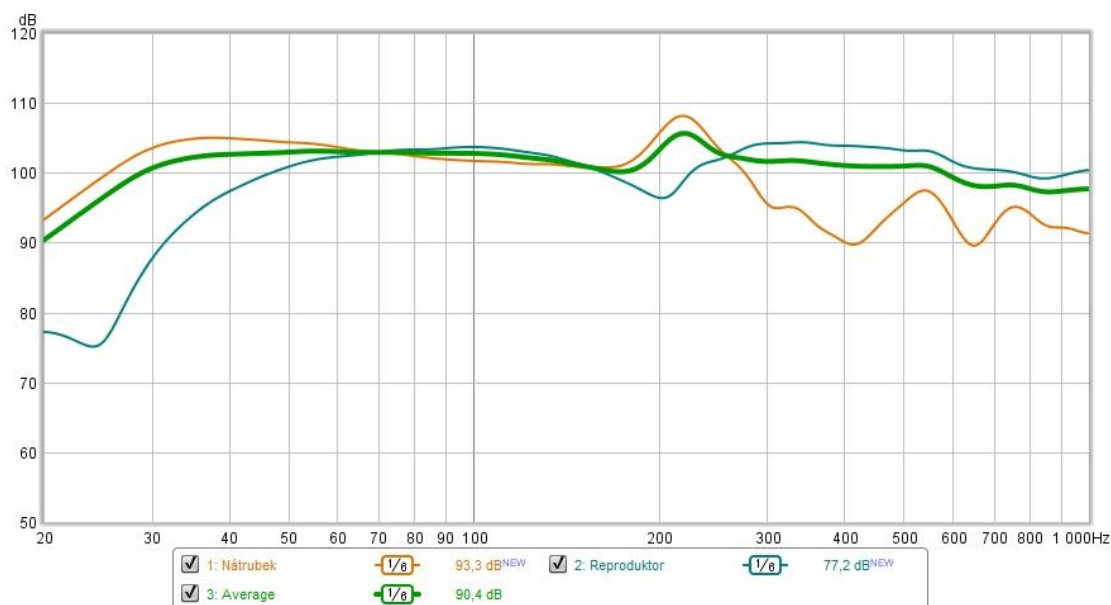
Ze změřené impedanční charakteristiky na Obr. 10-1 je vidět, že se lehce liší od charakteristiky měřené při naladění nátrubku, respektive před slepením. Rozdíl mezi impedančními maximy je přibližně $2,5 \Omega$ z čehož vyplývá, že by se mohl nátrubek ještě zkrátit, protože první imp. maximum má větší hodnotu. Charakteristika je velmi ovlivňována prostředím, což bylo možno vidět při měření. Pokud stála, respektive seděla osoba provádějící měření těsně před subwooferem, měnila se imp. charakteristika řádově o jednotky Ω . Například při měření charakteristiky ve větším pokoji bylo vyšší druhé impedanční maximum, a to přibližně o 8Ω , což by znamenalo potřebné prodloužení

nátrubku. To bylo uvedeno jen pro příklad, jak je tato charakteristika citlivá na prostředí, respektive akustiku prostředí.

10.2 Měření kmitočtové charakteristiky

Měření bude provedeno za pomoci softwaru REW popsaném v kapitole 5.3. Kmitočtová charakteristika se bude měřit z různých vzdáleností. Nejprve však přímo u reproduktoru, nátrubku a pak ze vzdálenosti 1 m od subwooferu, čímž se určí jeho citlivost při vstupním napětí 2 V RMS. Pro vývoj kmitočtové charakteristiky se vzdálenosti bude měřena i ve vzdálenostech 2, 5 a 10 m, charakteristika bude ovšem ovlivněna prostředím. Měření bude provedeno pomocí měřicího mikrofону Superlux ECM999 a kalibrace SPL bude provedena pomocí multifunkčního měřiče DT-8820.

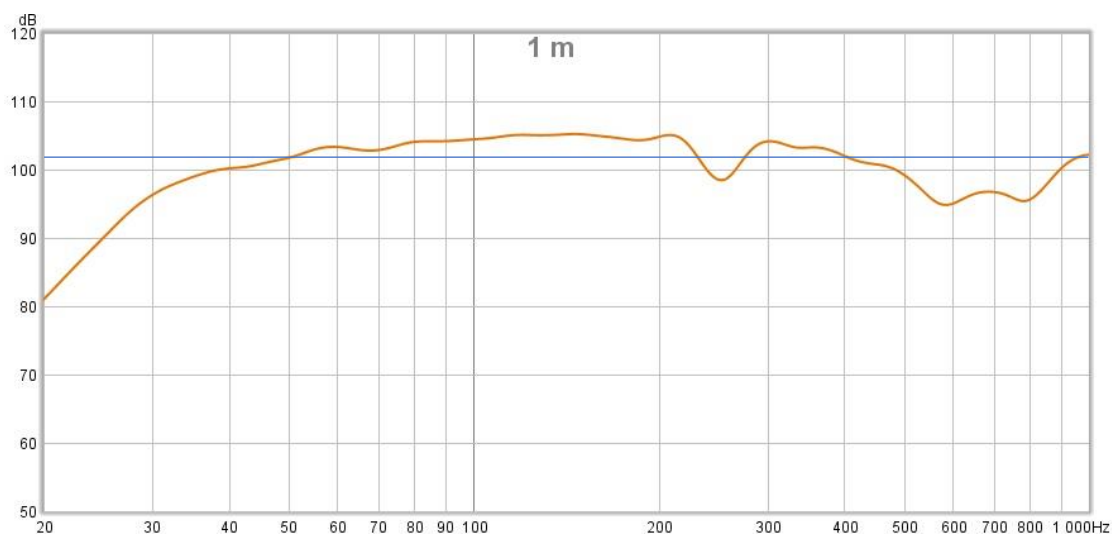
Na Obr. 10-2 jsou v jednom grafu průběhy kmitočtové charakteristiky měřené u reproduktoru a nátrubku. Charakteristika měřená u nátrubku má největší SPL na rezonančním kmitočtu, čímž je také potvrzena impedanční charakteristika. Na rezonančním kmitočtu by měl reproduktor mít pokles, je to dáno tím, že v tomto kmitočtu má reproduktor nejmenší výchylku, a proto je kmitočet produkován z rezonátoru, což je zde bassreflexový nátrubek. Bohužel tento jev není vidět na změřené charakteristice, protože měření nebylo provedeno v bezprostřední blízkosti membrány reproduktoru. Sumou těchto dvou průběhů se dostane výsledná kmitočtová charakteristika subwooferu.



Obr. 10-2 Měření u reproduktoru a nátrubku

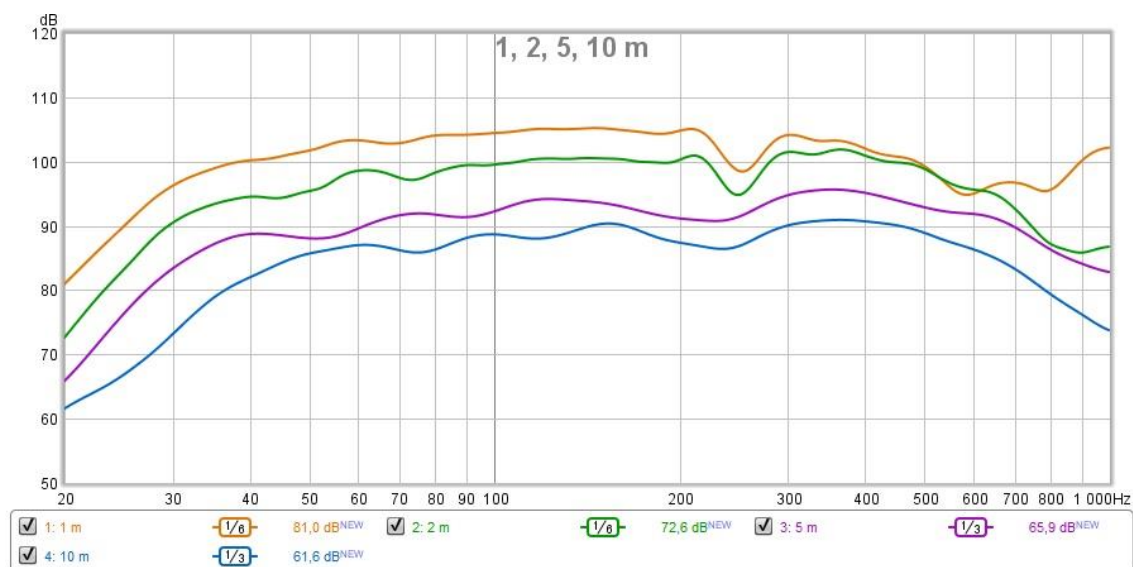
Ze změřené kmitočtové charakteristiky ve vzdálenosti 1 m je možno odečíst citlivost subwooferu, která je v daném pásmu 20 Hz - 1 kHz 100,2 dB, vypočteno ze změřených hodnot a vyznačeno modrou čarou v charakteristice na Obr. 10-3. Nicméně subwoofer

nebude využíván v celém změřeném pásmu, proto je třeba určit citlivost v pásmu na kterém bude využíván, a to 30–100 Hz. V tomto pásmu je citlivost subwooferu 98,8 dB.



Obr. 10-3 Měření ve vzdálenosti 1 m a napětí 2 V

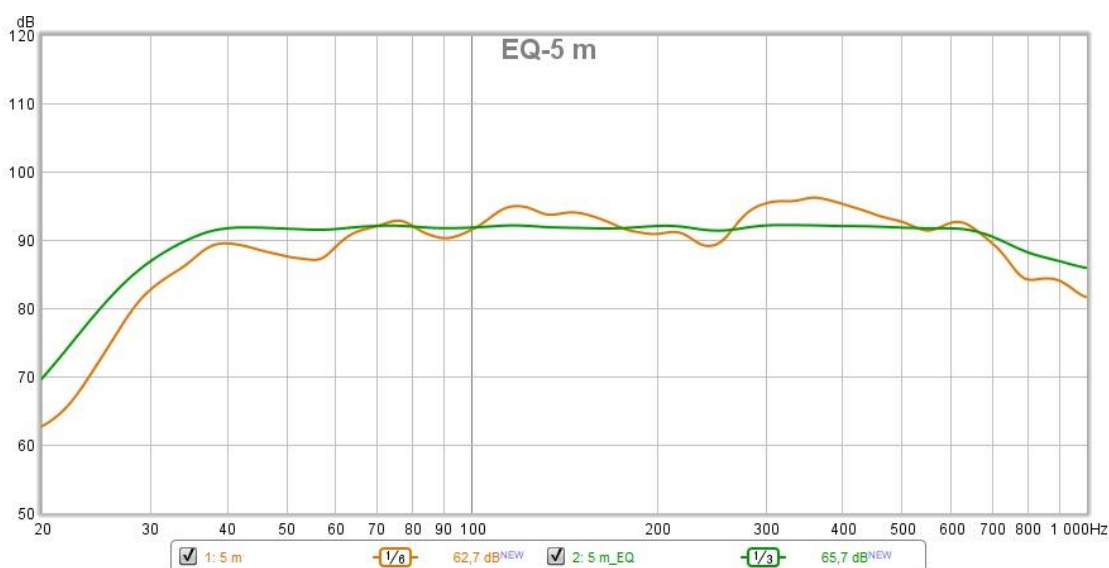
Dále jsou změřeny charakteristiky ze vzdáleností 2; 5 a 10 m, pro její vývoj, jsou umístěny v jednom grafu, aby je bylo možné porovnat.



Ze změřených charakteristik je zřejmé, že pro provoz subwooferu společně s dalšími částmi celé aparatury bude potřeba nějaký reproduktorový procesor, respektive „Loudspeaker management system“, který provede ekvalizaci. Smyslem ekvalizace je získat rovnou kmitočtovou charakteristiku, jak u subwooferu, tak u reproduktorového systému, které hraje zbytek kmitočtového pásma, tím pádem u celého reprodukováného pásma. Velmi záleží na typu procesoru, jejich ceny se pohybují od pár tisíc po statisíce korun. Můžou mít různé funkce, které ovlivňují výsledek celého řízení. Hlavně pro nastavení kmitočtové charakteristiky je dobré, když zařízení má RTA, pak je nastavení ekvalizace provedena na základě změřené skutečnosti. Subwoofery potřebují pro svou

správnou funkci crossover, tedy výhybku. Crossovery jsou další hlavní funkcí procesorů, kde je možno nastavit všechny potřebné parametry, jako jsou strmost a dělicí kmitočty.

I vyrobený subwoofer by potřeboval ekvalizaci, zejména pro zvýšení zisku na nízkých kmitočtech, není to však nutné. Často spodní pásmo do 100 Hz tedy to, co hraje právě subwoofer, bývá o pár dB zesíleno. Získají se tak hutnější basy, jelikož lidský sluch je právě na těchto kmitočtech méně citlivý. To je však každého věc, jak vnímá zvuk. Pro ukázkou ekvalizace je provedena právě pomocí programu REW ze změřené kmitočtové charakteristiky ve vzdálenosti 5 m. Ekvalizovaná křivka je podstatně rovnější, jak je možno vidět z Obr. 10-4, zisk na kmitočtu 20 Hz je přibližně 7 dB.



Obr. 10-4 Příklad ekvalizace

Pokud se porovná změřená kmitočtová charakteristika ve vzdálenosti 1 m na Obr. 10-3 se simulovanou charakteristikou na Obr. 8-5, je zjištěno, že strmost poklesu téměř souhlasí, tak jako je řečeno v teorii. Ve své podstatě odpovídá i průběh kmitočtové charakteristiky, avšak její měření není zcela přesné kvůli dostupným metodám měření. I přes nepřesnost hodnot lze konstatovat, že výsledný vyrobený subwoofer odpovídá navrženým hodnotám, respektive simulaci návrhu.

11. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo provést teoretický rozbor reproduktorových ozvučnic, vybrat vhodný reproduktor a ověřit jeho parametry měřením. Dále vytvořit kompletní návrh subwooferu pro PA aplikaci a provést jeho konstrukci, jejíž parametry byly ověřeny měřením.

Pro kvalitní návrh jsou v této práci probrány i simulační programy sloužící k přesnému návrhu včetně simulací charakteristik. Dále také program pro měření frekvenční charakteristiky a parametrů reproduktorů, jelikož správnost parametrů reproduktoru při návrhu je základní kámen úspěchu při výsledném měření.

Výběr reproduktorů byl prováděn na základě dostupného sortimentu v ČR. Bylo vybíráno z reproduktorů o velikosti 18 palců o výkonu alespoň 1 kW, přičemž měl mít parametr $Q_{ts}=0,3-0,4$ a $f_s=30-40$ Hz. Jeho cena neměla být větší než 10 000 Kč. Na základě těchto parametrů byl vybrán reproduktor 18P1000Nd od výrobce Beyma. Měření parametrů vybraného reproduktoru prokázalo, že jeho reálné parametry odpovídají těm uvedeným v katalogové dokumentaci. Liší se velmi málo, řádově pár procent, což je pro výrobce dobrý výsledek, jelikož měření jiných reproduktorů prokázalo, že se parametry mohou lišit až o 30 %.

Pro návrh ozvučnice byla vybrána bassreflexová ozvučnice se dvěma reproduktory a jedním bassreflexovým nátrubkem. Nejprve byly provedeny výpočty pro optimální objem ozvučnice a rezonanční kmitočet. Optimální objem byl vypočten $0,404\text{ m}^3$ a rezonanční kmitočet $37,85\text{ Hz}$. Následně byla provedena simulace v programu WinISD, dle které se prováděly korekce objemu a rezonančního kmitočtu, a na základě simulované impedanční charakteristiky tak, aby měla obě impedanční maxima na stejné hodnotě impedance. Tímto bylo třeba změnit objem na $0,4\text{ m}^3$ a rezonanční kmitočet na 41 Hz . Dále byly provedeny výpočty délky nátrubku, a to rovného a zahnutého. Ovšem u zahnutého nátrubku byl proveden pouze přibližný odhad délky, která se bude na základě měření zkracovat.

Podle vypočtených parametrů, respektive objemu byl proveden návrh konstrukce celého subwooferu, včetně výběru vhodného materiálu, komponentů a ochranných opatření. Konstrukce subwooferu nebyla jednoduchá, jelikož takto velká ozvučnice byla konstruována v dost malé dílně a její manipulace byla obtížná. Práce pak byla zdoluhavá, hlavně kvůli ladění nátrubku, jelikož musela být ozvučnice vynášena mimo prostor dílny, aby nebylo měření ovlivňováno akustikou prostoru dílny. I přes špatné pracovní podmínky se konstrukce vydařila.

Měření vyrobeného subwooferu prokázalo přibližnou shodnost se simulovanými hodnotami. Při měření impedanční charakteristiky byla zjištěna změna oproti jejímu průběhu při procesu ladění. Nastala změna o $2,5\ \Omega$, což je rozdíl mezi impedančními maximy. Měření kmitočtové charakteristiky prokázalo pozitivní výsledky, které se téměř shodují s výsledky simulace. Byla měřena v rozmezí 20-1000 Hz s napětím signálu 2 V,

což odpovídá výkonu 1 W. Měření nebylo provedeno v ideálních podmínkách, tomu také odpovídají výsledné charakteristiky. V měřeném pásmu byla stanovena citlivost subwooferu na 100,2 dB a v pásmu 20-100 Hz byla citlivost stanovena 98,8 dB.

Literatura

- [1] SVOBODA, Ladislav a Miloslav ŠTEFAN. *Reproduktory a reproduktorové soustavy*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1976. ISBN L.26-B2-IV-311/52213.
- [2] TOMAN, Kamil. *Reproduktory a reprosoustavy. Díl 1*. 1. vyd. Orlová: Kamil Toman, 2003, 212 s. : il. ISBN 8591459280805.
- [3] Komplexní návrh basových boxů, včetně simulace ozvučnice. *Repromania.net* [online]. 2008 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <http://www.repromania.net/teorie/komplexni-navrh-basovych-boxu-simulace-ozvucnice.php>
- [4] *Typy ozvučnic* [online]. 2005 [cit. 2019-12-23]. Dostupné z: <http://www.repromania.net/teorie/rozdeleni-ozvucnic.php>
- [5] *ARTA software: Home* [online]. Chorvatsko [cit. 2019-12-27]. Dostupné z: <http://www.artalabs.hr/index.htm>
- [6] *Návod k měření impedance a TS parametrů* [online]. Brno, 2012 [cit. 2019-12-27]. Dostupné z: <http://www.audioweb.cz/viewtopic.php?id=15625>
- [7] *18P1000ND* [online]. Španělsko [cit. 2019-12-31]. Dostupné z: <http://www.secozvuk.cz/download/product/00000062/18p1000nde.pdf>
- [8] PŘEKLIŽKA KVALITA: Třídy jakosti břízových multiplexů. *Siberia Export* [online]. [cit. 2020-05-26].
- [9] DIY Speakers. *Adam Hall* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.adamhall.com/shop/cz-en/diy-speakers/>
- [10] Děrované plechy. *WESTSTEEL* [online]. [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <https://www.weststeel.cz/derovane-plechy>
- [11] WARNEX STRUKTURLACK 1K. *Eshop barvy* [online]. [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <http://www.eshop-barvy.cz/detail.asp?idzbozi=540105000196>

Příloha 1 - Fotografie reproduktoru



A. Přední strana reproduktoru



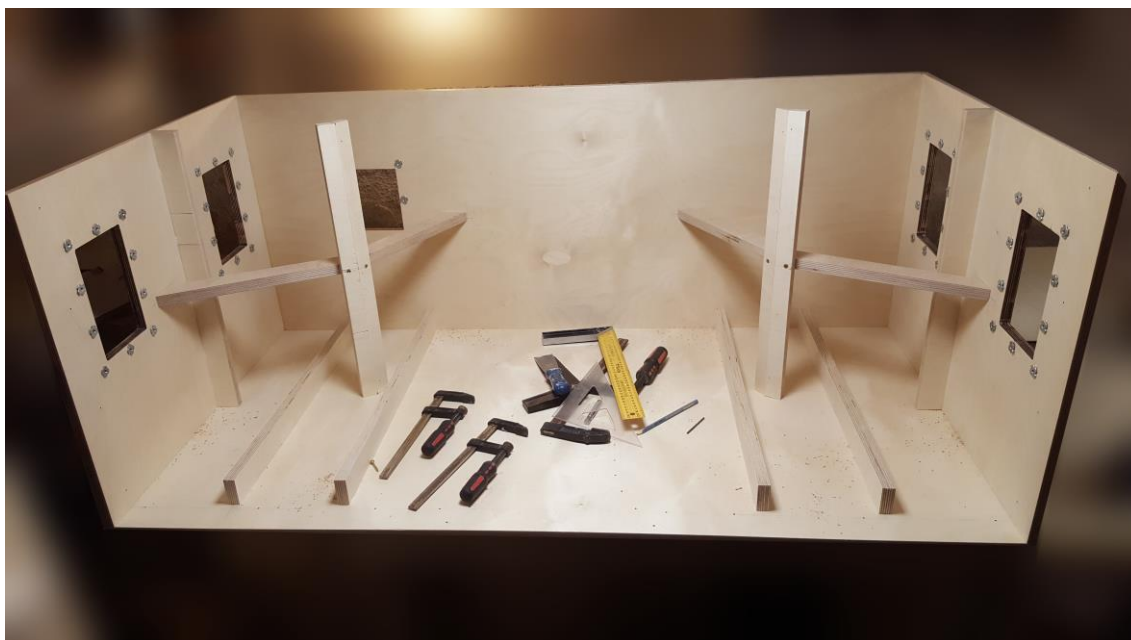
B. Zadní strana reproduktoru

Příloha 2 - Fotografie z výroby

A. Spleené části zahnutého nátrubku



B. Výztuhy



C. Připojovací terminál-popis



Příloha 3 - Použité tlumení



Příloha 4 - Finální výrobek

A. Čelní pohled



B. Čelní pohled



C. Madla



Příloha 5 - Měření kmitočtové charakteristiky

A. Měření u reproduktoru



B. Měření u bassreflexové nátrubku



C. Měření ve vzdálenosti 1 m

